



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Saad Dahleb Blida 1

Faculté Des Sciences

Département De Mathématiques

MÉMOIRE DE MASTER

Thème :

**Approche Métaheuristique Pour La Résolution
Du problème D'emploi Du Temps**

Spécialité : Recherche Opérationnelle.

Réalisé par :

- M^{elle} MEBREK Imane.
- M^{elle} TALEB Soumeïa Yasmine.

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

M^{me} R.ZITOUNI	MAA Univ . Blida1 Présidente
M^{me} F.ADLI	MAA Univ . Blida1 Examinatrice
M^{me} Z.BOUCETTA	MAA Univ . Blida1 Examinatrice
M^{me} S.ARRACHE	MAA Univ . Blida1 Promotrice

Année universitaire : 2023/2024.

Remerciements

Tous d'abord, nous remercions dieu, tout puissant, qui nous a donné la force, la santé, la patience et la volonté afin de réaliser ce travail

Nous tenons à remercier l'école technique de BLIDA, en particulier notre encadrant M. MESSAOUDI OUCHENE Mohamed qui nous a accueilli et orienté au sein de son service.

Nous tenons à présenter nos remerciements les plus distingués à notre promotrice

En guise de reconnaissance, nous tenons à présenter nos remerciements les plus distingués à notre encadrante «Mme. ARRACHE SAIDA » et nous la remercions pour l'attention, les conseils judicieux et soutien qu'elle nous a accordés durant cette période.

Nos sincères remerciements également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Nous devons ce que nous sommes aujourd'hui et ce que nous serons demain à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À ma chère mère, qui a toujours attendu avec moi l'affichage de chaque note. Tes prières ont toujours été avec moi. Tes larmes quand j'étais stressée, et ta joie quand j'ai réussi, me réconfortaient profondément. Je te suis infiniment reconnaissante.

À mon père, qui a toujours été là pour me transporter à la fac et m'encourager, surtout pendant les périodes d'examen. Tu m'as toujours dit calmement "ma fille", et ces mots sont gravés dans ma mémoire.

À mon fiancé, qui a toujours supporté mon stress et mon anxiété. Tu as été là pour moi dans les bons et les mauvais moments, ta présence à mes côtés a été une source de motivation et de réconfort. Avec tout mon amour et ma gratitude.

T. Yasmine

Dédicace

Louange à Dieu seul,

Ce modeste travail est dédié spécialement

À ma chère maman, ma raison de vivre, en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses sacrifices.

À mon cher papa (رحمه الله) pour son amour et son dévouement.

« À vous, mes parents, je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects, mes considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous témoigner mon affection et mon profond amour »

À ma chère sœur Douaa, je sais que ma réussite est très importante à tes yeux. Que Dieu te garde pour moi."

À ma chère amie Ikram, qui n'a jamais cessé de m'aider jusqu'au dernier moment, merci pour tout ce que tu as fait pour moi, merci pour ton amour et ta compréhension. Que Dieu te garde pour moi.

Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

M.Imane

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

I.1 Introduction	5
I.2 La planification d'horaires de travail	5
I.2.1 Qu'est-ce que la planification ?	5
I.2.2 Qu'est-ce qu'un planning ?	5
I.2.3 A Quoi sert un planning ?	6
I.3 Différents types de plannings	6
I.3.1 Types de plannings dans le domaine de la santé.....	6
I.3.2 Types de plannings dans le domaine de transport.....	7
I.3.3 Types de plannings dans le domaine de la pédagogie	7
I.4 Problème d'emploi du temps (PET)	8
I.4.1 Historique.....	8
I.4.2 A Quoi sert un emploi du temps ?.....	9
I.4.3 Comment un emploi du temps est élaboré ?	9
I.5 Cas d'étude « l'école technique de sonelgaz de blida ».....	10
I.5.1 Présentation de l'école technique de Blida (ETB).....	10
I.5.2 Ses infrastructures et moyens pédagogiques.....	10
I.5.3 Ses ressources humaines	10
I.5.4 Ses structures et missions.....	11
I.5.4.1 Le chargé d'Hygiène Sécurité et Environnement	11
I.5.4.2 Le chargé De Sûreté Internet de l'Etablissement	11
I.5.4.3 Le Chargé de l'Informatique	11
I.5.4.4 Le service Gestion Ressources Humaines	12

1.5.4.5 Le Service Finances Comptabilité (SFC/CSFC)	12
1.5.4.6 Le service Commercial et relations clients (SC/CSC).....	12
1.5.4.7 Le Centre de Ressources (CDR/CCDR).....	13
1.5.4.8 Le Division Logistique Interne (DLI/CDLI)	13
1.5.4.9 Le Département Pédagogique et Formation (DPF/CDPF)	15
I.6 Conclusion	19

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

III.1 Introduction	21
II.2 Le problème de planification des emplois du temps pour l'école technique de Blida	21
II.2.1 Définition du problème.....	21
II.3 Planification des Disponibilités des formateurs	23
II.3.1 la Matrice de Disponibilité	23
II.3.1.1 Structure de la Matrice	23
II.3.1.2 Importance dans la Planification des Emplois du Temps.....	24
II.4 Modélisation du problème traité.....	24
II.4.1 les données de l'école	24
A) Données	24
B) les variables	24
C) les contraintes	25
C.1 Les contraintes dures	26
C.2 Contraintes de préférences	26
D) La fonction objectif	27
D.1 Méthode de pénalité	27
D.1.1 Principe de la méthode	28
D.2 Fonctions de pénalisation	28
D.3 Fonction objectif associée au problème traité	29

II.5 Conclusion	30
-----------------------	----

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d’emplois du temps

III.1 Introduction	32
III.2 méthodes exactes	33
A. Méthodes de séparation et d’évaluation	33
B. Programmation dynamique.....	35
C. Programmation linéaire	35
III.3 Méthodes approchées	36
II.3.1 Heuristiques	36
II.3.2 Méta-heuristiques	36
II.3.2.1 Métaheuristique à solution unique.....	37
A. Le Recuit Simulé	37
B. La Recherche Tabou	38
II.3.2.2 Métaheuristique à population de solutions	39
A. Les algorithmes génétiques	39
B. Les colonies de fourmis	40
C. Optimisation par essaim de particule.....	41
II.4 Conclusion	46

Chapitre IV : Résolution du problème

IV.1Introduction	48
IV.2 Résolution du problème par la méthode exacte Branch and Bound (B&B)	48
IV.3 Adaptation de l’algorithme de Branch and Bound.....	49
IV.4 Adaptation de l’algorithme PSO (1) pour la résolution du problème	49
IV.5 l’algorithme PSO (1)	51
IV.6 Fonctionnement de l’Algorithme PSO (1)	52
IV.7 L’Optimisation Quotidienne PSO (2)	52

IV.8 Conclusion	55
------------------------------	-----------

Chapitre V : Implémentation et résultats

V.1 Introduction	57
V.2 Choix du langage de programmation	57
V.3 Machines utilisées	58
V.4 Expérience numérique	58
V.5 Exécution de la méthode de branch and bound	60
V.6 Le résultat obtenu par la méthode exacte branch and bound	62
V.7 Codage des particules (Optimisation par essaim particulaire PSO)	63
V.8 Le résultat obtenu par la méthode essaim particulaire	64
V.9 Comparaison des pénalités entre les promotions	67
V.10 Comparaison entre Branch and Bound et PSO(1) pour la Génération d'emplois du temps	68
IV.11 Comparaison de l'optimisation par essaim particulaire (PSO) : Une Semaine vs Un Jour	70
V.12 Conclusion	71
Conclusion Générale	72
Annexe	75

Table des figures

Figure I.1 : Organisation de l'ETB.....	11
Figure I.2 : Organisation de DLI.	13
Figure III.1 : Classification des méthodes d'optimisation.	32
Figure III.2 : Principe algorithme séparation et évaluation (B&B).	33
Figure III.3 : Schéma général de l'algorithme du Recherche Tabou (RT).	39
Figure III.4 : Déplacement d'une particule.	42
Figure III.5 : Différent type de topologie de voisinage pour essaim particulaire.	45
Figure IV.1: schéma représentatif de notre méthode de résolution PSO (1)	50
Figure IV.2 : Schéma représente l'adaptation de l'algorithme PSO (1) pour le problème d'emploi du temps.....	51
Figure IV.3: Schéma représentatif de la méthode de résolution PSO (2)	54
Figure V.1 : La matrice de disponibilité des formateurs vacataires pour la promotion 1	60
Figure V.2 : La matrice de disponibilité des formateurs vacataires pour la promotion 2.....	60
Figure V.3 : Disponibilité des formateurs.....	60
Figure V.4 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 1.....	61
Figure V.5 : Disponibilité des formateurs.....	61
Figure V.6 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 2.....	61
Figure V.7: Fonction de Fitness.....	63
Figure V.8 : Comparaison des pénalités entre les promotions	67

Liste des tableaux

Table II.1 : tableau représentatif de créneaux de la semaine.....	24
Table II.2 : tableau représentatif de créneaux de week-end.	24
Table V.1 : Liste des formateurs permanents pour la promotion 1	59
Table V.2 : liste des formateurs vacataires pour la promotion 1.....	59
Table V.3: Liste des formateurs permanents pour la promotion 2.....	59
Table V.4 : Liste des formateurs vacataires pour la promotion 2	59
Table V.5 : Emploi du temps obtenu par une méthode exacte itérative pour la promotion 1...62	
Table V.6 : Emploi du temps obtenu par une méthode exacte itérative pour la promotion 2.. 62	
Table V.7: Emploi du temps initial pour la promotion 1.	64
Table V.8 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 1.....	65
Table V.9 : Emploi du temps initial pour la promotion 2.	66
Table V.10: Meilleur emploi du temps pour la promotion 2.	66
Table V.11 Comparaison entre Branch and Bound et PSO(1) pour la Génération d'emplois du temps	69
Table V.12 : Comparaison entre PSO (1) et PSO (2)	70

Introduction générale

Introduction générale

Contexte

Dans la vie humaine en général, le problème d'emploi du temps se manifeste par la nécessité constante de jongler avec les multiples engagements, responsabilités et activités qui remplissent nos journées. Que ce soit dans notre vie professionnelle, académique, sociale ou personnelle, nous sommes confrontés à un flux incessant de demandes et d'obligations qui exigent une gestion efficace du temps.

La planification d'horaire de travail est un exemple concret de problème d'emploi du temps. Il consiste à élaborer un emploi du temps efficace pour un ensemble d'employés tout en tenant compte de diverses contraintes telles que les disponibilités des employés, les exigences du travail, les temps de pause, les normes de sécurité, les réglementations du travail et les préférences individuelles. Ce défi est particulièrement complexe dans les environnements de travail avec des effectifs variables, des horaires flexibles et des demandes fluctuantes. La recherche opérationnelle et les logiciels de gestion des ressources humaines sont souvent utilisés pour résoudre ce problème en trouvant des solutions optimales qui équilibrent les besoins de l'entreprise et le bien-être des employés.

Le problème d'emploi du temps est un problème NP-complet car aucun des algorithmes existants n'est capable de trouver une solution optimale pour toutes les instances du problème dans un temps polynomial. Cela signifie que, bien que des solutions exactes puissent être trouvées pour certains cas particuliers, il n'existe pas d'algorithme capable de résoudre efficacement tous les scénarios possibles du problème d'emploi du temps en un temps raisonnable. Par conséquent, le problème d'emploi du temps est classé comme NP-complet en raison de sa complexité et de la difficulté de trouver une solution optimale dans un délai acceptable.

Les métaheuristiques représentent des approches plus sophistiquées, guidant la recherche à travers l'espace des solutions de manière plus efficace et plus intelligente. En combinant des méthodes heuristiques avec des stratégies d'exploration globale, elles visent à trouver des solutions de haute qualité dans des délais raisonnables, permettant ainsi d'explorer diverses régions de l'espace des solutions, d'éviter les optima locaux et de converger vers des solutions proches de l'optimum global.

Dans le domaine pédagogique, la conception d'emplois du temps englobe la planification minutieuse des cours, des activités et des pauses pour les enseignants et les étudiants, nécessitant une coordination attentive pour optimiser les ressources et le temps disponible. Des outils logiciels spécialisés peuvent faciliter ce processus.

Dans ce cadre, il nous a été proposé par l'école Technique de « Sonelgaz », l'élaboration d'une solution mathématique et informatique au problème de la répartition des différents cours sur l'ensemble des enseignants, tout en respectant les contraintes posées par les gestionnaires de l'école. Notre mission consiste à développer une solution palliative aux inconvénients et aux défaillances du système actuel.

Problématique

Voici un résumé de nos objectifs :

- Vérifier le maximum des contraintes donnée par l'école .
- Minimiser la fonction de pénalité.
- Optimiser la répartition des plannings pour améliorer le rendement global.

Notre contribution, s'appuie sur une étude comparative ayant portée sur L'Algorithme exact « branch and bound » d'une part et la méthode Approchée « Essaim particulière » d'autre part.

Par la première méthode, nous avons pu adapter notre problème sur le plan théorique. Cependant, En raison de la taille considérable des paramètres inhérents au problème posé, la résolution par la méthode exacte se révèle non applicable que pour des très petites instances du problème. En revanche, la méthode « essaim particulière » à l'avantage par rapport au système de travail actuel de procurer des résultats satisfaisants en prenant en compte un maximum de contraintes et dans des temps relativement courts.

Organisation du document

Ce mémoire s'est structuré en cinq chapitres :

- Dans le premier chapitre , nous introduisons les concepts liés à la planification des horaires de travail, en explorant les différents types de plannings utilisés dans divers domaines professionnels ainsi que la présentation de l'école technique de Blida.
- Le deuxième chapitre se focalise sur la présentation des méthodes de résolution des problèmes d'optimisations en particulier le problème d'emploi du temps.

- Dans le troisième chapitre, nous abordons la problématique soulevée par l'école technique de Blida, puis nous avons présenté la modélisation mathématique correspondante.
- Dans le quatrième chapitre, nous présentons les concepts des méthodes de résolution que nous avons choisis pour la résolution de notre problème, à savoir l'algorithme d'essaim particulière et la méthode de branch and bound
- Enfin, le cinquième chapitre sera consacré à la description de l'application que nous avons réalisée pour mettre en œuvre la solution développée ainsi que les résultats obtenus.
- L'annexe est réservé à la présentation des différents plannings réalisés.

Chapitre I

Généralités sur les emplois du temps

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

I.1 Introduction :

Dans de nombreux domaines de la vie professionnelle, on se trouve confronter aux problèmes de la planification des horaires. En effet la question de l'aménagement du temps et ses enjeux préoccupe tous les planificateurs, qui incitent à proposer des méthodes et des techniques pour aider à gérer au mieux les horaires. Ce chapitre expose dans un premier lieu, la problématique de planification des horaires dans un contexte général et dans un second lieu, la représentation de l'organisme d'accueil « l'école technique de sonelgaz » .

I.2 La planification d'horaires de travail :

Les problèmes de planification d'horaires de travail se retrouvent autant dans les entreprises d'industrie que dans les services publics tels que : la santé, l'éducation etc...

La planification d'horaires de travail est un processus très complexe, qui vise à organiser des activités humaines (principalement de travail) dans le temps et à optimiser l'utilisation des ressources, de façon à couvrir un besoin exprimé par une charge de travail prévisionnelle sous diverses contraintes. Elle aboutit à des programmes définissant les horaires de travail et de repos de la force de travail [8].

Pour mieux cerner ce qui est la planification et la complexité à sa réalisation, on s'intéresse à un ensemble de questions :

I.2.1 Qu'est-ce que la planification ?

La planification est un instrument de gestion dont l'objectif est d'aboutir à des programmes permettant d'organiser et planifier le travail. Ceci passe par la détermination des capacités de tout un chacun et par le recensement des activités futures et des besoins en personnel.

La planification vise à affecter les ressources humaines pour chaque intervalle de temps, de telle manière que les besoins par intervalle et les différentes contraintes soient satisfaites [8].

I.2.2 Qu'est-ce qu'un planning ?

C'est un document qui permet de représenter les relations entre les tâches à effectuer et les ressources disponibles au fil du temps.

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

Les plannings peuvent être journaliers (spécifiant les pauses et périodes de travail de la journée de chaque employé), hebdomadaires (utilisés pour une paie hebdomadaire), mensuels (utilisés pour le calcul des coûts pour les besoins de la paie mensuelle) ou annuels (permettant de gérer les congés annuels des employés). Le planning, permet aussi de partager la vision des travaux à réaliser avec l'ensemble des intervenants. Il permet à chacun de visualiser ce qu'il doit faire, de vérifier si des tâches n'ont pas été oubliées et si tout le monde a confiance dans le fait de mener à bien les tâches dans les délais prévus [4].

I.2.3 A Quoi sert un planning ?

Depuis le début des années 80, la gestion des ressources humaines a été reconnue comme une activité stratégique pour l'entreprise. Avec cette reconnaissance, l'intérêt d'élaborer des plannings s'est vu accroître de plus en plus car ils permettent :

- aux entreprises exerçant une activité continue ou quasi-continue de répartir convenablement leur personnel (compagnies aériennes, entreprises de transports, hôpitaux, etc...),
- aux entreprises cherchant à se rendre plus accessibles à la clientèle d'étaler les horaires d'ouverture (grands magasins, banques, etc...),
- à toutes les entreprises de surmonter leur exigences de productivité et de mieux gérer les présences et absences de leur personnel.
- Les situations où un planning est utile sont nombreuses. Elles justifient l'existence de différentes formes de plannings dans un même système : plannings à court, moyen et à long terme [8].

I.3 Différents types de plannings

Dans la construction de plannings d'horaires de travail, créer un planning optimisé d'une journée est aisé, mais créer un bon planning pour un mois ou une année est beaucoup plus complexe, en plus de la complexité combinatoire du problème, il faut tenir compte de la diversité des contraintes applicables et qui sont souvent contradictoires. Dans ce qui suit, nous définirons les différents types de planning.

I.3.1 Types de plannings dans le domaine de la santé

Les plannings dans les domaines de la santé sont des calendriers de travail où figurent à la fois le temps, et l'affectation des personnels (jours et horaires de travail, congés et repos). Ils

sont établis au niveau de chaque équipe, ils sont à la fois une tâche, un document d'organisation du travail, et un élément contribuant à la gestion administrative du personnel. Cette tâche est parmi les plus difficiles et les plus délicates. Difficile parce qu'elle repose sur la recherche de solutions combinatoire, répond à des contraintes multiples.

I.3.2 Types de plannings dans le domaine de transport

Le transport est une activité complexe qui fait intervenir des investissements lourds, du personnel qualifié et une informatique très coûteuse, En effet, dans le transport routier, il est toujours nécessaire de gérer aux mieux les ressources existantes en optimisant les investissements.

I.3.3 Types de plannings dans le domaine de la pédagogie

La confection d'horaires (ou confection d'emploi du temps) dans les établissements scolaires est un travail très important, difficile à réaliser, c'est typiquement un problème de résolution de contraintes, NP-difficile (non déterministe en temps polynomial), dont la solution n'est pas, a priori connue dans le cas général. Pour fournir une solution, nécessite d'être capable de s'adapter aux changements dynamiques de l'environnement en tenant compte de la diversité des contraintes telles que:

- L'interdépendance des programmes
- L'interdépendance d'enseignement.
- La multitude des matières étudiées et les contraintes sur ces matières.
- La durée des cours.
- Les contraintes de disponibilité des enseignants.
- La disponibilité limitée des salles...

C'est un problème qui peut être défini comme un problème qui fait assigner quelques événements dans un nombre limité de périodes, il peut être divisé en deux catégories principales.

- La confection d'horaires des cours.
- La confection d'horaires des examens.

Ces problèmes sont soumis à beaucoup de contraintes qui sont d'habitude divisées en deux catégories :

- Les contraintes dures

- Les contraintes souples

Nous allons nous concentrer spécifiquement sur les plannings pédagogiques, notamment sur les emplois du temps parmi tous les types de planning mentionnés [11].

I.4 Problème d'emploi du temps (PET)

Parmi l'ensemble des problèmes de planification d'horaire, on repère celui de l'emploi du temps qui semble être au premier moment très difficile. Car la réalisation manuelle de ce dernier, demande la participation de plusieurs personnes aptes et capables de prendre des décisions cruciales, afin de mettre en œuvre un emploi du temps acceptable. Or, la modification d'une donnée du problème initial peut changer complètement la solution trouvée, et parfois ça demande de recommencer à zéro le même travail [4].

I.4.1 Historique

Les premières activités d'emploi du temps ont été effectuées manuellement et un emploi du temps typique, une fois construit est resté statique avec seulement quelques changements nécessaires. Cependant la nature des enseignements a changé considérablement au cours des années et ainsi les exigences en matière de confection d'emploi du temps sont devenues beaucoup plus compliquées qu'ils ont eu l'habitude de l'être. L'intérêt de génération d'emploi du temps a augmenté dramatiquement dans les années 60 principalement en la raison de la disponibilité d'ordinateurs pour exécuter les algorithmes développés. Autour de la fin des années 60 quelques tentatives qui ont traité le problème en considérant des études de cas commençaient à être publiées. Par exemple en 1969, Lawrie a développé un modèle pour le problème de confection d'horaire en employant l'approche de programmation linéaire. Pendant les années 1970, plusieurs publications ont abordé le problème d'emploi du temps. Les principales techniques qui semblent avoir été plus répandues dans les années 1970 et les années 1980 sont les techniques ayant pour racine l'intelligence artificielle et sont basées sur les méthodes du recuit simulé, la recherche Tabou et les algorithmes génétiques. En 1985, De Werra a décrit les divers problèmes traitant le problème d'emploi du temps d'une façon formelle et a fourni les différentes formulations dans une tentative de les résoudre. Il a aussi décrit les approches considérées les plus importantes à ce temps-là. En 1986, Carter a fait une analyse sur de réelles applications de confection d'emploi du temps de plusieurs universités. Junginger a décrit dans la même année, les recherches faites en Allemagne sur le problème d'emploi du temps scolaires et les approches qui étaient basées sur des heuristiques directes, en particulier il a décrit les divers logiciels mis en œuvre et leur utilisation dans les divers établissements. En 1994, Corne a fait une enquête

sur l'application des algorithmes génétiques au problème d'emploi du temps et a controversé les futures perspectives de telles approches en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus avec d'autres approches. Dans les dernières décennies, les sujets de résolution du problème d'emploi du temps ont été principalement limités à la (Recherche Opérationnelle) (les techniques employées étaient naturellement mathématiques). Dans la décennie actuelle, la contribution de l'intelligence Artificielle a fourni au problème de résolution de l'emploi du temps une heuristique moderne telle que les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la recherche Tabou [19].

I.4.2 A Quoi sert un emploi du temps ?

Depuis le début des années 80, la gestion des ressources humaines a été reconnue comme une activité stratégique pour un établissement. Avec cette reconnaissance, l'intérêt d'élaborer des emplois du temps s'est vu accroître de plus en plus car ils permettent :

- Aux établissements exerçant une activité continue ou quasi-continue de répartir convenablement leur personnel (universités, entreprises de transports, hôpitaux, etc. . .)
- Aux établissements cherchant à se rendre plus accessibles à la clientèle d'étaler les horaires d'ouverture (grands magasins, banques, etc. . .).
- A toutes les établissements de surmonter leur exigence de productivité et de mieux gérer les présences et absences de leur personnel. Les situations où un emploi du temps est utile sont nombreuses. Elles justifient l'existence de différentes formes de ce dernier dans un même système : emplois du temps à court, moyen et à long terme [19].

I.4.3 Comment un emploi du temps est élaboré ?

Pour que les emplois du temps élaborés soient satisfaisants, ils doivent vérifier un ensemble de contraintes et établir un meilleur compromis entre les différents acteurs (exemple : le chef du département, le planificateur, les enseignants et les étudiants). Lorsque les différentes solutions alternatives sont connues, une négociation se déroule de la manière suivante : chaque acteur donne son opinion. Les points d'accord sont très vite expédiés et les points incertains sont débattus. Et des solutions de compromis sont dégagées. Les difficultés de négociation augmentent avec le nombre d'acteurs et le nombre de solutions alternatives. L'aspect combinatoire (pour l'élaboration des emplois du temps) rend d'autant plus difficile la négociation, car les opinions sont plus difficiles à formuler. Les moyens informatiques apportent une aide certaine notamment dans l'acquisition et la confrontation des données individuelles [19].

I.5 Cas d'étude « l'école technique de sonelgaz de blida » [15]

I.5.1 Présentation de l'école technique de Blida (ETB)

L'Ecole Technique de Blida (ETB), d'une superficie de 13 hectares est située au centre de la ville de Blida. Elle dispose d'un cadre d'apprentissage adapté à sa mission grâce à : Ses infrastructures et aires d'entraînement pédagogiques équipées d'installations électriques et gazières, conformes à celles de l'exploitation et aux normes internationales ; la disponibilité de conditions de prises en charge complète pour les apprenants, et son accessibilité. Créée en 1949 par EGA (électricité et gaz d'Algérie), ETB est aujourd'hui une Ecole de renom. Elle a conservé sa mission première : former dans les métiers de l'électricité et du gaz.

I.5.2 Ses infrastructures et moyens pédagogiques

L'Ecole Technique de Blida a une capacité d'accueil de 800 places pédagogiques. Organisée pour dispenser des formations orientées métiers, l'école dispose d'infrastructures dédiées aux formations aux métiers de base dont 25 ateliers spécialisés, avec aires d'entraînement, assurant la réalisation des travaux pratiques et permettant aux stagiaires d'acquérir les gestes professionnels, dans le strict respect des procédures de travail et des règles de sécurité, avec les moyens matériels nécessaires et des conditions similaires au milieu de travail.

I.5.3 Ses ressources humaines (Données statistiques de l'année 2022)

Le personnel est composé de 138 agents recrutés, Aussi, il est à rappeler que le vivier formateur de l'Ecole Technique de Blida est constitué d'un total de 670 formateurs vacataires dont :

- 437 Formateurs Externe du groupe Sonelgaz soit 65%. La répartition de ces formateurs par statut est présentée comme suit :
 - ✓ Salarié : 292 formateurs, soit 43%.
 - ✓ Freelance : 31 formateurs, soit 5%.
 - ✓ Retraité : 114 formateurs, soit 17%.
- 233 Formateurs Interne du groupe soit 35%.

I.5.4 Ses structures et missions

- L'école Technique de Blida (ETB) a pour missions de concevoir et de réaliser des actions de formation et de perfectionnement aux métiers techniques.
- Assistant Qualité Pédagogique (AQP) a pour mission de veiller à la conformité de la mise en œuvre des processus pédagogiques, d'apporter un soutien au personnel enseignant et d'accompagner les structures pédagogiques de l'école pour l'atteinte des objectifs escomptés.

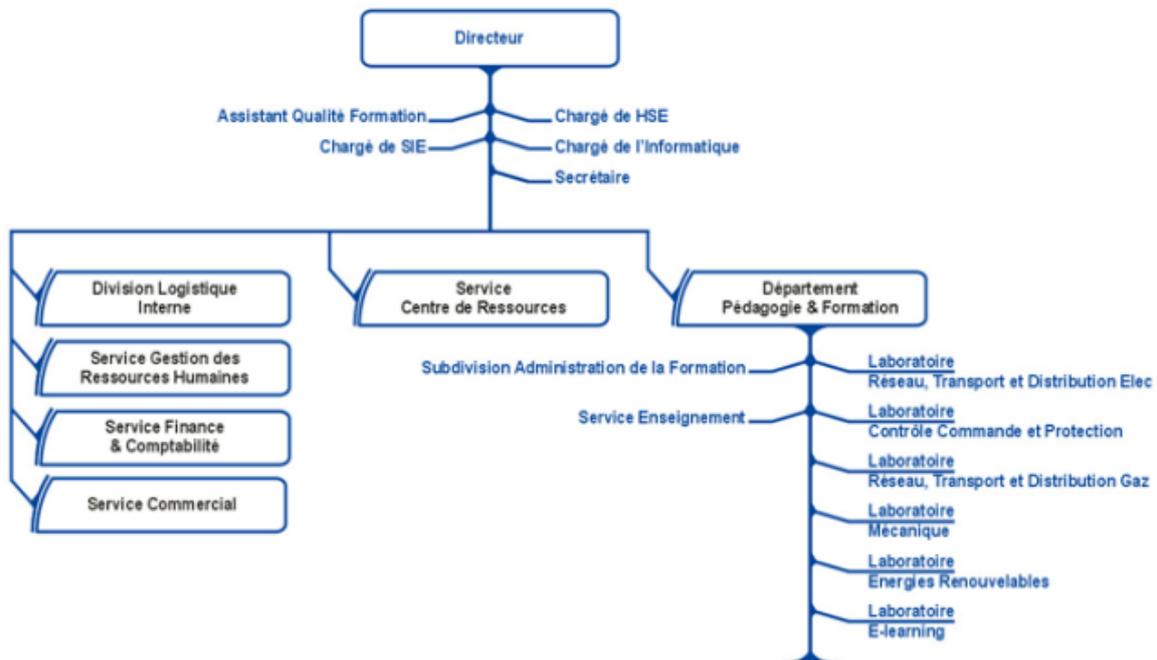


Figure I.1 : Organisation de l'ETB .

I.5.4.1 Le chargé d'Hygiène Sécurité et Environnement (HSE)

Est chargé de garantir aux travailleurs et aux stagiaires les conditions d'hygiène, de sécurité, d'environnement et de protection contre les risques professionnels.

I.5.4.2 Le Chargé De Sûreté Interne de l'Etablissement (SIE)

Est chargé de suivre en permanence la situation de la sûreté interne de l'école.

I.5.4.3 Le Chargé de l'Informatique (CINFO)

Doit maintenir un système d'information fiable et intégré de gestion et mettre à disposition des utilisateurs des ressources informatiques communes.

I.5.4.4 Le Service Gestion Ressources Humaines (SRH /CSRH) :

- Assurer la coordination des diverses activités de GRH au sein de l'école ou du centre de formation, notamment, le recrutement, l'accueil / intégration, l'affectation, la promotion, la mutation.
- Mettre à la disposition des structures de l'école les moyens humains nécessaires conformément aux programmes arrêtés et procédures en vigueur.
- Veiller à l'application uniforme de la réglementation et contrôler sa mise en œuvre.

I.5.4.5 Le Service Finances Comptabilité (SFC/CSFC)

- Assurer la concordance des comptes et les travaux de clôture de l'exercice.
- Assurer le règlement des factures inhérentes aux dépenses de fonctionnement, d'équipement et de gros entretien de l'école.
- Gérer la trésorerie et les comptes bancaires et CCP affectés à l'école.
- Assurer la tenue de la comptabilité générale et analytique de l'ensemble des opérations de dépenses et recettes du centre.
- Animer le processus budgétaire au niveau de l'école.
- Veiller à l'application de la réglementation des marchés au niveau de l'école et animer les commissions prévues.

I.5.4.6 Le service Commercial et relations clients (SC/CSC)

- Etablir les facturations des prestations de l'école.
- Assurer et suivre le recouvrement des créances de l'école.
- Etablir des états périodiques de réalisation et assurer le reporting.
- Constituer et gérer le fichier clients.
- Préparer et transmettre les programmes de formation aux clients.
- Réception et prise en charge des bons de commande des clients.

I.5.4.7 Le Centre de Ressources (CDR/CCDR)

A pour missions de mettre à la disposition des stagiaires et des équipes pédagogiques les ressources et les services nécessaires pour la réalisation et l'amélioration de leurs activités pédagogiques et pour leur développement personnel.

I.5.4.8 La Division Logistique Interne (DLI/CDLI)

Assure toutes les activités supports nécessaires à la réalisation de l'activité principale de l'école.

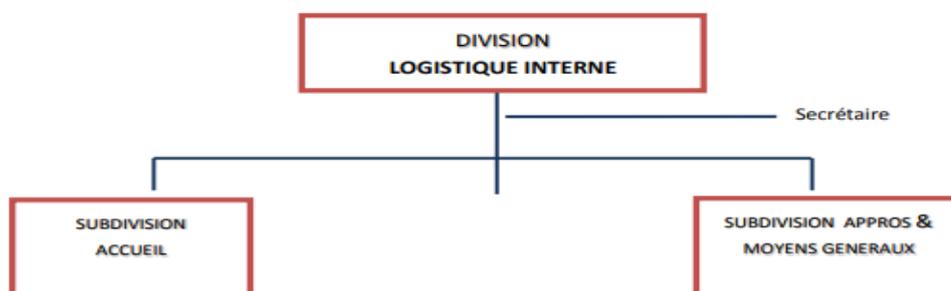


Figure I.2 : Organisation de DLI.

1. La subdivision Accueil (AAI-AAP : Agent Accueil Internat & Pédagogie)

Elle a pour missions de :

- Accueillir, orienter et prendre en charge les stagiaires et séminaristes selon le programme hebdomadaire PP et FPS et les listes prévisionnelles des inscrits.
- Enregistrer et dispatcher la liste des stagiaires à recevoir à toutes les parties concernées (pédagogie, internat, ...).
- Assurer les formalités de prise en charge des stagiaires (remises des badges, dotations pédagogiques, affectation de la chambre, remise des clés...).
- Assurer l'interface avec la restauration (petit déjeuner, Déjeuner, Diner), l'hébergement et la pédagogie.
- Assurer l'interface avec les prestataires de lingerie (lavage et changement de linge et effets de travail des stagiaires).
- Mettre en place un système d'information de l'activité accueil des stagiaires.
- Assurer la gestion de l'activité internat.

2. La subdivision approvisionnement et moyens généraux :

➤ **Activité Appros :**

- Assurer l'approvisionnement en fournitures et matériels (dossiers pré qualification, consultations,...) .
- Gérer les stocks de fournitures, matériels...
- Préparer les dossiers d'investissement.
- Assurer la gestion des magasins (MAG : Magasinier)

➤ **Activité Moyens Généraux :**

1. Gérer les Affaires Générales

- Gestion du standard et du bureau d'ordre.
- Gestion du courrier et des tableaux d'affichage.
- Gestion des relationnels (réservation d'hôtels/billetterie...).
- Gestion et suivi des utilités communes (gardiennage/entretien) .
- Réalisation des travaux courants d'entretien.

2. Assurer la Gestion du parc véhicule

- Réaliser les prestations véhicules pour les structures internes.
- Gérer et suivre le carburant .
- Gérer et suivre les carnets de bords .
- Réaliser les opérations d'entretien curatif courant .
- Suivre les opérations d'entretien préventif de 1er degré .

3. Gérer le patrimoine (infrastructures et mobilier)

- Gérer les infrastructures pédagogiques et administratives du centre.
- Gérer l'internat.

I.5.4.9 Le Département Pédagogique et Formation (DPF/CDPF)

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

Le département a pour missions de :

- Mettre en œuvre le programme de formation des sociétés du groupe dans les conditions requises de qualité, de délai et de coût.
- Assurer les plans de charge de chacun des laboratoires et services y afférents.
- Veiller à la bonne marche des structures laboratoires.
- Veiller à une utilisation optimale des ressources humaines et matérielles de la structure.
- Etablir les tableaux de bord et bilans d'activités périodiques de la structure et en assurer le reporting.
- Veiller au maintien et au développement des compétences et de l'expertise du personnel.
- Assurer la Veille pédagogique (sur les pratiques, les méthodes et outils pédagogiques...) et technologique.
- Veiller à l'entretien et au développement des moyens et infrastructures pédagogiques.

A. Les Laboratoires (LABO/Clabo)

- Encadrer une ou plusieurs spécialités à vocation professionnelle.
- Assister les clients dans l'expression de leurs besoins.
- Assurer l'ingénierie des actions de formation.
- Mettre en œuvre les actions de formation à travers :
 - La prospection du recrutement des formateurs et leur affectation.
 - L'affectation des installations pédagogiques.
 - La supervision de la préparation des dossiers d'animation par les formateurs.
 - Assurer la réalisation des enseignements.
 - L'élaboration des épreuves d'évaluation avec les formateurs.
 - La participation aux jurys de fin de formation et à l'évaluation des formations.
- Assurer l'encadrement du personnel du laboratoire et veiller au développement de leurs compétences.

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

- Assurer la capitalisation des connaissances de la RH du laboratoire (ingénierie, méthode d'animation...).
- Veiller à l'entretien et au développement des moyens et infrastructures pédagogiques.
- Ecoute/client d'après-vente : à travers le dispositif de traitement systématique des réclamations clients et par les enquêtes de satisfaction réalisées auprès de ces derniers à l'achèvement de chaque action de formation.
- Veille du marché aval et tenue à jour du fichier/ clients de l'Ecole.
- Assurer la prospection de marchés et de nouveaux clients, par différents leviers (Techniques marketing, démarchage de proximité ...), proposer et développer de nouveaux produits et assurer leur diffusion.

Le laboratoire courant fort (LCF) :

Prenant en charge tous les domaines de formation relevant des métiers du transport et de la distribution de l'électricité (il intègre les travaux sous tension).

Le laboratoire courant faible (LCf) :

Prenant en charge tous les domaines de formation relevant des métiers de contrôle commande et protection de l'électricité.

Le laboratoire gaz (LG) :

Prenant en charge tous les domaines de formation relevant des métiers du transport et distribution du gaz.

Le laboratoire mécanique (LM) :

Prenant en charge les domaines de formation relevant de la production et particulièrement des machines tournantes.

Le laboratoire des énergies renouvelables (LENR):

Prenant en charge les domaines de formation relevant des énergies renouvelables.

Le service enseignement général (SEG):

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

Prenant en charge tous les domaines de formation relevant des domaines communs et prestations spécifiques (math, informatique, dessin industriel, éducation physique...).

Le laboratoire @Learning (L@) :

Chargé de développer les plateformes de formation à distance dans des domaines ciblés.

A.1 L'Activité ingénierie formation (ACESAF/RSF : Responsable Session Formation)

- Assurer la prise en charge et l'interprétation des besoins en formation des clients.
- Réaliser le montage du programme de formation adapté aux besoins identifiés, précisant toutes les conditions pédagogiques de la formation (contenus, volumes horaires, timing, ressources humaines et matérielles, modalités d'évaluation...).
- Etablir les conventions et contrats de formation.
- Assurer le suivi de la mise en œuvre de la formation.
- Organiser les jurys de fin de formation.
- Assurer l'évaluation globale de l'action de formation, l'élaboration du rapport d'évaluation de la formation et définition des actions correctives ou d'amélioration.
- Proposer de nouveaux produits.
- Introduire et développer de nouvelles méthodes d'enseignement.

A.2 Le service enseignement général (SEG/CSEG)

- Mettre à la disposition des laboratoires les compétences nécessaires aux enseignements dans le domaine des activités transverses ou d'enseignement général (math, physique, topographie, communication, informatique, législation du travail, commandement, éducation physique...).
- Participer à l'élaboration des CDC et du dispositif de formation avec les ACESAF.
- Assurer la prospection pour le recrutement de formateurs vacataires.
- Participer à l'élaboration des fiches de progression avec les formateurs.
- Suivre la préparation des dossiers d'animation par les formateurs.

Chapitre I : Généralités sur les emplois du temps

- Elaboration des épreuves d'évaluation avec les formateurs.
- Assurer la mise à disposition des moyens matériels (PC, Data show, CD, DVD, logiciel, applications de gestion ...) ainsi que l'entretien et la maintenance des équipements des salles informatiques.
- Assurer la gestion des formateurs vacataires.
- Assurer la gestion et la mise à jour de la base de données des formateurs.

A.2.1 Les formateurs

- Participer avec le chargé de l'ingénierie à l'élaboration du contenu des modules de formation qui relèvent de leur spécialité respective.
- Elaborer les fiches de progression du cours.
- Préparer les dossiers d'animation : contenus de cours, des exercices pratiques...).
- Dispenser le cours (théorique ou pratique).
- Elaborer les épreuves d'évaluation.
- Renseigner les bulletins (note et moyenne) à la fin de chaque phase avec appréciation du stagiaire.
- Elaborer la fiche d'évaluation de la promotion pour le conseil de classe et les jurys de fin de formation.
- Participer aux conseils et aux jurys.
- Assurer l'entretien et la maintenance des ateliers et des équipements.
- Réaliser l'inventaire des ateliers mis sous leur responsabilité.
- Solliciter la hiérarchie pour la mise à disposition du matériel, outillage et matière d'œuvre.
- Proposer des actions de développement des installations pédagogiques.
- Proposer des actions de développement des enseignements dans leur spécialité à travers une veille technologique.

B. Subdivision administration de la formation (SAF/CSAF/ASAF : Agent SAF)

- Accueillir les stagiaires au plan pédagogique (états de présence, désignation de délégué, tenue de cahiers de texte,...).
- Planification de la formation : Etablir les supports de formation (charges d'enseignements, emplois du temps des formateurs permanents et vacataires, calendrier des visites techniques, fiche de synthèse pour les conseils de classe, et jury...).
- Suivre la programmation des enseignements (prévu/réalisé).
- Etablir les attestations de succès et de stage.
- Tenir les dossiers des stagiaires.
- Tenir les archives pédagogiques.
- Alimenter et maintenir la base de données formation.
- Assurer le reporting (formation, stagiaires).
- Editer les états de paiement des formateurs vacataires.

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la gestion des horaires de travail, la définition d'un planning, les différents types de planning et le problème de l'emploi du temps. Nous avons également donné la présentation de l'école technique Sonelgaz de Blida, ses méthodes pédagogiques, ses ressources humaines, ainsi que ses structures et son objectif.

Chapitre II

Étude et modélisation du problème

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

II.1 Introduction :

La planification efficace des emplois du temps constitue un défi complexe et crucial dans de nombreux contextes éducatifs et organisationnels. Ce problème implique la coordination optimale des ressources telles que les enseignants, les salles de classe et les horaires des cours, tout en satisfaisant diverses contraintes et objectifs spécifiques. Une bonne gestion des emplois du temps peut non seulement améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi favoriser un environnement d'apprentissage ou de travail harmonieux et productif.

Au début de ce chapitre, nous abordons le problème spécifique de la planification des emplois du temps à l'école technique de Blida. Ensuite, nous présenterons la modélisation mathématique des contraintes, visant à formaliser chaque élément du problème de manière précise et systématique. Enfin, nous explorerons la fonction objectif qui servira à évaluer et à optimiser la solution proposée.

II.2 Le problème de planification des emplois du temps pour l'école technique de Blida :

II.2.1 Définition du problème :

Le problème hebdomadaire de planification des emplois du temps pour l'école technique de Blida est influencé par de nombreux paramètres et doit satisfaire un grand nombre de contraintes. Les entités impliquées dans la construction d'un emploi du temps réalisable et efficace sont les enseignants, les cours, les classes et les périodes de temps. Plus précisément, les enseignants doivent enseigner certains cours à des classes spécifiques dans chaque promotion et ce processus éducatif doit avoir lieu à des périodes de temps spécifiques. Par conséquent, pour créer un emploi du temps réalisable, il faut attribuer, pour chaque triple enseignant-cours-classe, les périodes de temps pendant lesquelles le processus d'enseignement aura lieu. Bien entendu, la création d'un tel emploi du temps doit être réalisée de manière à satisfaire autant de contraintes que possible, soit partiellement soit totalement. Les contraintes concernant la construction d'un emploi du temps pour deux promotions peuvent être divisées en deux catégories : les contraintes « rigides » et les contraintes « souples ». Elles peuvent également être divisées en

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

celles liées aux enseignants et celles liées aux classes. Lorsque toutes les contraintes rigides sont satisfaites, un emploi du temps réalisable est construit, c'est-à-dire un emploi du temps qui peut effectivement être utilisé par les deux promotions pour lesquelles il a été créé. Cependant, la qualité d'un emploi du temps est principalement affectée par le nombre de contraintes souples qui sont satisfaites. L'objectif principal est bien entendu de créer un emploi du temps réalisable tout en maximisant sa qualité.

Pour commencer la construction d'un emploi du temps, toutes les données d'entrée nécessaires doivent être disponibles. Ces données fournissent toutes les informations nécessaires sur les relations entre les enseignants, les classes et les cours, ainsi que les contraintes rigides et souples respectives. Ces informations comprennent les cours enseignés par chaque enseignant, les heures enseignées par chaque enseignant par semaine ainsi que les classes auxquelles ces cours sont enseignés. De plus, des informations sur la Co-enseignement et les sous-classes doivent être disponibles. Enfin, les jours de disponibilité de chaque enseignant à l'école doivent être inclus. Toutes ces informations doivent être disponibles en tant que données d'entrée.

La sortie, résultant de l'exécution de l'algorithme PSO proposé, est bien entendu l'emploi du temps hebdomadaire qui montre pour chaque enseignant la classe à laquelle il a été assigné pour enseigner un cours à chaque heure de la semaine. À partir de cet emploi du temps, on peut facilement tirer toutes les conclusions relatives à sa qualité, c'est-à-dire combien et quelles contraintes sont violées. À ce stade, il convient de noter qu'un emploi du temps hebdomadaire typique dans l'école technique de Blida est divisé en 7 jours et chaque jour en 8 heures d'enseignement.

Les contraintes rigides suivantes doivent être satisfaites pour que l'emploi du temps résultant soit réalisable :

- Disponibilité journalière des enseignants : l'emploi du temps résultant doit assigner chaque enseignant à enseigner uniquement les jours où il est disponible à l'école.
- Disponibilité horaire des enseignants : l'emploi du temps résultant doit assigner chaque enseignant à enseigner une seule classe à une période de temps spécifique.
- Disponibilité horaire des classes : l'emploi du temps résultant doit assigner chaque classe à suivre un seul cours à une période de temps spécifique.
- Heures vides des classes : l'emploi du temps résultant doit attribuer à chaque classe des périodes vides (périodes sans enseignement).

II.3 Planification des Disponibilités des formateurs

II.3.1 la Matrice de Disponibilité :

La matrice de disponibilité est une représentation structurée des disponibilités des formateurs à temps partiel pour l'élaboration d'emplois du temps dans un établissement scolaire. Elle est cruciale pour garantir une répartition efficace des enseignants en fonction de leurs horaires disponibles.

II.3.1.1 Structure de la Matrice :

1. Définition des Jours de la Semaine

La matrice est basée sur les jours de la semaine (par exemple, Lundi à Dimanche) en tant qu'axes horizontaux, ce qui permet une représentation claire des disponibilités sur une base quotidienne.

2. Identification des formateurs

Chaque formateur à temps partiel est identifié individuellement et placé comme première colonne de la matrice, permettant ainsi de visualiser rapidement les disponibilités spécifiques de chaque enseignant.

3. Marquage des Disponibilités

Chaque case de la matrice est remplie avec une valeur qui indique la disponibilité du formateur pour le jour correspondant :

- 1 : Indique que le formateur n'est pas disponible en raison d'engagements existants ou de plages horaires déjà assignées.
- 0 : Indique que le formateur est disponible.

4. Conversion en Structure de Données Adaptée à l'Affichage

Une fois que toutes les disponibilités ont été vérifiées et mises à jour, la matrice est convertie en une structure de tableau (par exemple, utilisant des bibliothèques comme « tabulate » en Python) pour une présentation claire et compréhensible. Cette étape est cruciale pour permettre une inspection visuelle rapide et une gestion efficace des disponibilités lors de la planification des emplois du temps.

II.3.1.2 Importance dans la Planification des Emplois du Temps :

La matrice de disponibilité joue un rôle essentiel dans la création d'emplois du temps équilibrés et efficaces, en garantissant que les professeurs à temps partiel sont affectés de manière optimale en fonction de leurs disponibilités. Cela aide à minimiser les conflits d'emploi du temps et à maximiser l'utilisation des ressources humaines dans un établissement scolaire.

II.4 Modélisation du problème traité :

II.4.1 les données de l'école :

A) Données :

- Une séance(créneau) est composée de deux heures (2h).
- Le nombre total de créneaux dans la journée est 4 séances (8h).
- Le nombre total de créneaux dans la semaine est 28 séances (56h), dont 8 créneaux (16h) libres.

Les séances sont réparties comme suit :

Dimanche				Lundi				Mardi				Mercredi				Jeudi			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Table II.1 : tableau représentatif de créneaux de la semaine.

Vendredi				Samedi			
21	22	23	24	25	26	27	28

Table II.2 : tableau représentatif de créneaux de week-end.

B) les variables :

On définit la variable bivalente suivante qui dépend de matière, de créneau et de formateur.

$$x_{ijc} = \begin{cases} 1 & \text{Si le module } j \text{ est affectée au formateur } i \text{ pendant le créneau } c. \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Notation :

i: Formateur *i*.

p: Un formateur permanent.

v: Un formateur vacataire.

j: Le Module *j*.

t: Le module TP .

s: Le module ESP (Education physique et sportive)

c: Le Créneau *c*.

l: Le Créneau *l*.

w_h : Le Poids Du Bloc De Contraintes *h*.

p_h : Le Bloc de Contrainte *h*.

NFP: Le Nombre De Formateurs Permanents.

NFV: Le Nombre De Formateurs Vacataires.

NM: Le Nombre De Matières.

n: Nombre de blocs de contraintes (dans notre cas $n = 12$).

Dans notre travail, nous avons les données suivantes :

$$|NFP| = 6$$

$$|NFV| = 5$$

$$|NM| = 11$$

$f_{(i \times c)}$: Représente la matrice de disponibilité des formateurs, telle que :

$$f(i, c) = \begin{cases} 1 & \text{Si le formateur } i \text{ est occupé pendant le créneau } c . \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

C) les contraintes

La résolution de problème d'emploi du temps requiert la satisfaction de deux types de contrainte: contrainte dure et contrainte de préférence

C.1 Les contraintes dures

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

Ce type de contraintes doit être obligatoirement satisfait dans toutes les situations car la violation de l'une de ces contraintes rend l'emploi du temps inefficace dans la réalité. On distingue dans notre cas huit contraintes dures :

- Un formateur permanent(p) ne peut être affecté à plus d'un module (j) dans le même créneau (c) .

$$\sum_{p=1}^{NFP} x_{pjc} \leq 1 \quad \forall j \in NM, \forall c = \overline{1,28}$$

- Un formateur vacataire (v) ne peut être affecté à plus d'un module (j) dans le créneau (c)

$$\sum_{v=1}^{NFV} x_{vjc} \leq 1 \quad \forall j \in NM, \forall c = \overline{1,28}$$

- Un formateur permanent(p) ne doit pas dépasser 24heures de travail par semaine suivant la législation du travail c'est-à-dire 12 créneaux où chaque créneau dure 2h .

$$\sum_{c=1}^{28} x_{pjc} \leq 12 \quad \forall p \in NFP, \forall j \in NM$$

- Un formateur permanent(p) ne doit pas dépasser 4 séances (8h) dans la journée .

$$\sum_{c=k}^{k+3} x_{pjc} \leq 4 \quad \forall p \in NFP, \forall j \in NM, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

C.2 Contraintes de préférences :

N'exigent pas la vérification stricte, mais d'approcher au maximum l'objectif voulu.

Dans notre cas, on distingue :

- Il est préférable de programmer un formateur vacataire toute la journée.

$$\sum_{c=k}^{k+3} x_{vjc} = 4 \quad \forall v \in NFV, \forall j \in NM, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

- Il est préférable de ne pas affecté les formateurs permanents pendant les jours de fin de semaine.

$$\sum_{c=21}^{28} x_{pjc} = 0 \quad \forall p \in NFP, \forall j \in NM$$

- Eviter les séances non consécutives à un formateur permanent .

$$\sum_{c=k}^{k+2} (x_{pjc} + x_{pjc+1}) \geq 3 \quad \forall p \in NFP, \forall j \in NM, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

- Eviter les séances non consécutives à un formateur vacataire .

$$\sum_{c=k}^{k+2} (x_{vjc} + x_{vjc+1}) \geq 3 \quad \forall v \in NFV, \forall j \in NM, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

- Les séances de ESP ne doivent pas être affectées dans le même jour que les séances de TP (travaux pratiques) pour les formateurs vacataires .

$$\sum_{c=k}^{k+1} \sum_{l=k}^{k+1} (x_{vsc} + x_{vtl}) = 0 \quad \forall v \in NFV, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

- Les séances de ESP ne doivent pas être affectées dans le même jour que les séances de TP (travaux pratiques) pour les formateurs permanents .

$$\sum_{c=k}^{k+1} \sum_{l=k}^{k+1} (x_{psc} + x_{ptl}) = 0 \quad \forall p \in NFP, \forall k = \{1,5,9,13,17,21,25\}$$

D) La fonction objectif :

L'objectif du problème posé est de trouver une solution optimale qui satisfait le maximum de contraintes citées ci-dessus, que nous avons introduites par une fonction objectif qui représente le minimum de pénalités posées par les contraintes violées, ce qui nous a mené à faire appel aux méthodes de pénalité que nous allons présenter dans cette section [7].

D.1 Méthode de pénalité :

La méthode de pénalité est une technique utilisée dans la programmation mathématique pour résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes. L'idée principale de cette méthode est de transformer un problème de programmation avec contraintes en un problème de programmation sans contraintes en ajoutant des termes de pénalité à la fonction objectif. Ces termes de pénalité sont conçus pour pénaliser les violations des contraintes, de sorte que la solution optimale du problème transformé respecte les contraintes originales.

Cette méthode de pénalité est qualifiée de méthode duale car elle parvient à atteindre la solution du problème en explorant l'extérieur de l'ensemble des solutions réalisables. Une fois qu'une solution réalisable est atteinte, elle se révèle être optimale [7].

D.1.1 Principe de la méthode [1] :

Considérons le problème : $\begin{cases} \min f(x) \\ x \in S \end{cases}$ (II.1)

Supposons que dans le problème (II.1), f est continue sur \mathbb{R}^n et S est un ensemble de contraintes dans \mathbb{R}^n . L'idée de la méthode de pénalité est de remplacer le problème (II.1) par le problème sans contraintes de la forme.

$\min(f(x) + c P(x))$ (II.2)

où c est une constante positive appelée paramètre de pénalité et $P: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ appelée fonction de pénalité si elle satisfait les conditions :

- i) P est continue \mathbb{R} .
- ii) $p(x) \geq 0$ pour tout $x \in \mathbb{R}^n$.
- iii) $P(x) = 0$ si et seulement si $x \in S$.

Pénalité de Beltrami [16]

Si : $S = \{x: g_i(x) \leq 0 \ i \in I, h_j(x) = 0 \ j \in J\}$

La fonction de pénalité est donnée par :

$p(x) = \sum_{i \in I} (\max\{0, g_i(x)\})^2 + \sum_{j \in J} (h_j(x))^2$

On note : $g_i^+(x) = \max\{0, g_i(x)\}$

D.2 Fonctions de pénalisation [16]

Avec les fonctions de pénalisation, $p(x)$ reste nul tant que x appartient à X mais croit avec la violation des contraintes. Pour n_e , contraintes d'égalité, on peut prendre par exemple une fonction de pénalisation l_2

$$p_1(x) = \sum_{i=1}^{n_e} [|c_i^e(x)|]^2$$

Ou une fonction de pénalisation Me l_1

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

$$p_2(x) = \sum_{i=1}^{ne} |c_i^e(x)|$$

Pour n, contraintes d'inégalité, ces fonctions de pénalisation deviendraient

$$p_3(x) = \sum_{j=1}^{ni} [\max\{0, c_j^i(x)\}]^2$$

Et

$$p_4(x) = \sum_{j=1}^{ni} \max\{0, c_j^i(x)\}$$

D.3 Fonction objectif associée au problème traité [7]:

Nous cherchons à minimiser les pénalités sur chaque contrainte violée (non respectée).

$$\min \sum_{h=1}^n w_h \cdot p_h$$

où n : Nombre de blocs de contraintes.

En utilisant la méthode de pénalité citée auparavant. On obtient la fonction objectif suivante :

$$\begin{aligned} & \min\{[\sum_{c=1}^{28} \sum_{j=1}^{NM} (\max\{0, \sum_{p=1}^{NFP} x_{pjc} - 1\}) \times w_1] + [\sum_{c=1}^{28} \sum_{j=1}^{NM} (\max\{0, \sum_{v=1}^{NFV} x_{pjc} - 1\}) \times w_2] + \\ & [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{p=1}^{NFP} (\max\{0, \sum_{c=1}^{28} x_{pjc} - 12\}) \times w_3] + [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{p=1}^{NFP} (\max\{0, \sum_{c=k}^{k+3} x_{pjc} - 4\}) \times w_4] + \\ & [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{v=1}^{NFV} (|4 - \sum_{c=k}^{k+3} x_{pjc}|) \times w_5] + [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{p=1}^{NFP} (|-\sum_{c=1}^{28} x_{pjc}|) \times w_6] + [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{p=1}^{NFP} (\max\{0, 3 - \\ & \sum_{c=k}^{k+2} (x_{pjc} + x_{pjc+1})\}) \times w_7] + [\sum_{j=1}^{NM} \sum_{v=1}^{NFV} (\max\{0, 3 - \sum_{c=k}^{k+2} (x_{vjc} + x_{vjc+1})\}) \times w_8] + \\ & [\sum_{p=1}^{NFP} (|-\sum_{c=k}^{k+3} \sum_{l=k}^{k+3} (x_{psc} \times x_{ptl})|) \times w_9] + [\sum_{v=1}^{NFV} (|-\sum_{c=k}^{k+3} \sum_{l=k}^{k+3} (x_{vsc} \times x_{vtl})|) \times w_{10}] + \\ & [\sum_{p=1}^{NFP} (|4 - \sum_{c=k}^{k+3} x_{ptc}|) \times w_{11}] + [\sum_{v=1}^{NFV} (|4 - \sum_{c=k}^{k+3} x_{vtc}|) \times w_{12}] \} \end{aligned}$$

Cette fonction objectif représente une agrégation des fonctions de pénalité pour chaque bloc de contraintes, tel que :

$$p_1(x) = \sum_{c=1}^{28} \sum_{j=1}^{NM} \left(\max \left\{ 0, \sum_{p=1}^{NFP} x_{pjc} - 1 \right\} \right)$$

w_1 : poids associé au bloc de contrainte 1 .

Remarque :

Chapitre II : Étude et modélisation du problème

Si le $h^{ième}$ bloc de contraintes n'est pas satisfait, son poids est alors retenu, sinon, la pénalité associée est nulle.

II.5 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation et à la modélisation mathématique du problème réel d'emploi du temps qui nous a été proposé par l'école technique de « Sonelgaz » de Blida, on a détaillé les différents types de contraintes relatives à ce problème ainsi que la fonction objectif associée.

Chapitre III

Méthodes de résolution des problèmes D'emplois du temps

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

III.1 Introduction :

Le problème d'emploi du temps, fait partie des problèmes d'optimisation combinatoire. Cette dernière, occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Elle consiste à comprendre un problème réel et pouvoir le transformer en un modèle mathématique à fin d'extraire ses propriétés structurelles et le résoudre. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire sont souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre. Les différentes méthodes de résolution développées en recherche opérationnelle peuvent être regroupées en deux catégories principales : les méthodes exactes et les méthodes approchées. Le chapitre actuel est principalement divisé en deux parties, chacune d'entre elles étant dédiée à la présentation des diverses méthodes qui font partie de chaque classe.

Classification des méthodes d'optimisation combinatoire

La résolution d'un problème d'optimisation combinatoire est réalisée à l'aide des méthodes suivantes :

- **Méthodes exactes (complètes) :** elles se basent généralement sur une recherche complète de l'espace des combinaisons afin de trouver une solution optimale.
- **Méthodes approchées (incomplètes) :** Elles permettent de trouver une bonne solution (pas forcément optimale) dans un temps raisonnable [5].

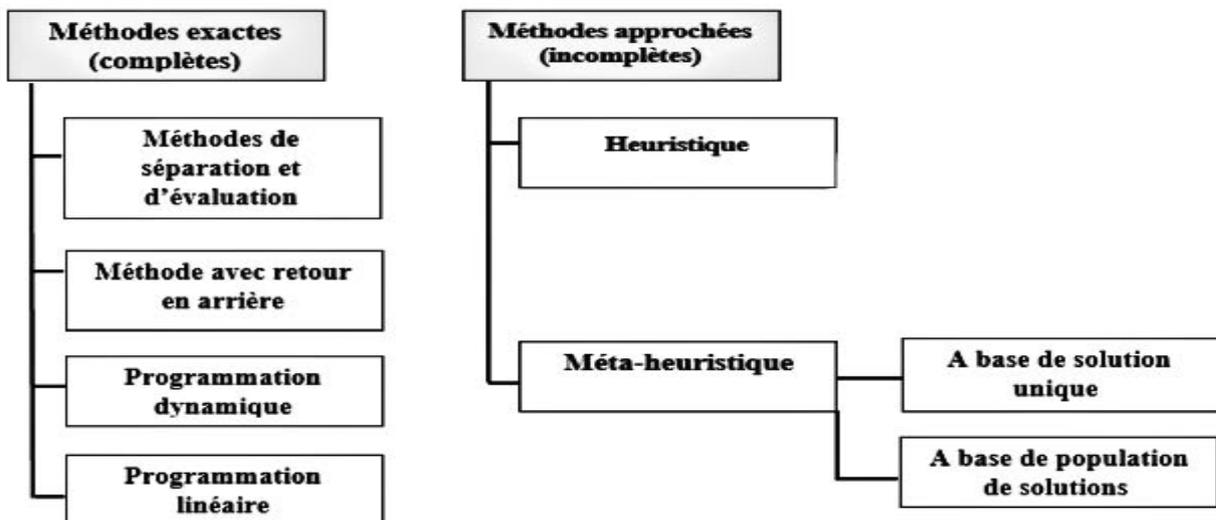


Figure III.1 : Classification des méthodes d'optimisation [5].

III.2 Méthodes exactes

Le principe essentiel d'une méthode exacte consiste généralement à énumérer, souvent de manière implicite, l'ensemble des solutions dans le but de trouver la solution optimale.

Les trois familles de méthodes exactes sont :

- Méthodes de séparation et d'évaluation.
- Programmation dynamique.
- Programmation linéaire [5].

A. Méthode de séparation et d'évaluation (Branch and Bound) :

La méthode de Branch and Bound est un algorithme assez général qui joue un rôle très important dans la théorie de l'optimisation combinatoire et globale. L'idée générale de la méthode est de décomposer le problème primaire en sous-problèmes parallèles (Branching) qui peuvent être graduellement plus faciles à résoudre, puis évaluer les bornes inférieures et supérieures (Bounding) des valeurs des solutions optimales sur ces problèmes secondaires.

L'énumération des solutions du problème P consiste à construire un arbre Branch and Bound dont les noeuds sont des sous-ensembles de solutions du problème P, et les branches sont les nouvelles contraintes à respecter. La taille de l'arbre dépend de la stratégie utilisée pour la construire. Pour ce faire, cette méthode se dote d'une fonction qui permet de mettre une borne inférieure (en cas de minimisation) ou une borne supérieure (en cas de maximisation) sur certaines solutions pour, soit les exclure, soit les maintenir comme des solutions réalisables[20].

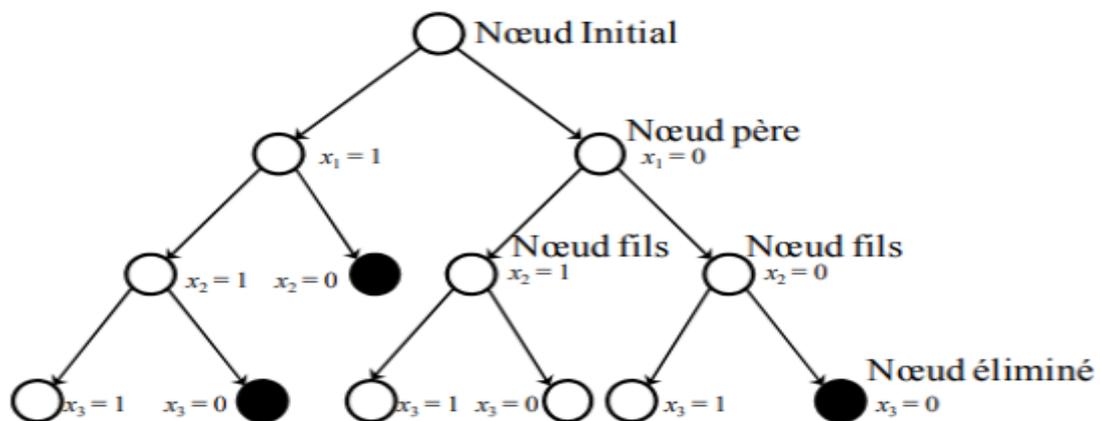


Figure III.2 : Principe de l'algorithme de séparation et évaluation (B&B)[10].

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

L'algorithme est basé sur trois axes principaux:

- L'évaluation
- La séparation
- La stratégie de parcours.

Principe d'évaluation :

Le principe d'évaluation a pour objectif de connaître la qualité des nœuds à traiter. La méthode de Branch and Bound utilise deux types de bornes.

- une borne inférieure de la fonction d'utilité du problème initial,
- une borne supérieure de la fonction d'utilité.

La connaissance d'une borne inférieure du problème et d'une borne supérieure de la fonction d'utilité de chaque sous-problème permet de stopper l'exploration d'un sous-ensemble de solutions qui ne sont pas candidates à l'optimalité : si pour un sous-problème la borne supérieure est plus petite que la borne inférieure du problème, l'exploration du sous-ensemble correspondant est inutile.

D'autre part, chacune des solutions partielles potentielles possède une borne supérieure et une autre inférieure. Ces dernières sont utilisées pour couper quelques branches de l'arbre et ainsi éviter d'explorer tout l'arbre [10].

Le principe de séparation

Le principe de séparation consiste à diviser le problème en un certain nombre de sous problèmes qui ont chacun leur ensemble de solutions réalisables. En résolvant tous les sous problèmes et en prenant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Ce principe de séparation est appliqué de manière récursive à chacun des sous-ensembles tant que celui-ci contient plusieurs solutions.

Remarque : La procédure de séparation d'un ensemble s'arrête lorsqu'une des conditions suivantes est vérifiée :

- on connaît la meilleure solution de l'ensemble.
- on connaît une solution meilleure que toutes celles de l'ensemble .

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

- on sait que l'ensemble ne contient aucune solution admissible [10].

La stratégie de parcours :

La stratégie de parcours est la règle qui permet de choisir le prochain sommet à séparer parmi l'ensemble des sommets de l'arborescence.

Parmi les stratégies de parcours les plus connues, on peut citer :

- **La profondeur d'abord** : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire
- **Le meilleur d'abord** : Cette stratégie consiste à explorer des sous-problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale
- **La largeur d'abord** : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées [5].

B. Programmation dynamique :

La programmation dynamique est une approche générale qui apparaît comme un outil utile pour résoudre divers problèmes en optimisation combinatoire. L'idée de base qui se trouve derrière cette technique a été introduite par Bellman. Cette approche consiste à décomposer un problème en sous-problèmes plus simples, ensuite résoudre ces sous-problèmes et combiner leurs solutions afin de trouver une solution globale [10].

L'efficacité de cette méthode repose sur le principe d'optimalité énoncé par le mathématicien Richard Bellman : « **toute politique optimale est composée de sous-politiques optimales** » [5].

C. Programmation linéaire :

La programmation linéaire est l'une des techniques d'optimisation les plus répandues en recherche opérationnelle. Ceci est dû principalement à la facilité de la modélisation, à l'efficacité des algorithmes développés et à l'existence sur le marché de nombreux logiciels. De plus, la généralisation de micro-informatique a mis la programmation linéaire à la portée de tous [6].

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

Une des méthodes les plus connues pour résoudre des programmes linéaires en nombre réels est la méthode du Simplex. En théorie, elle a une complexité non polynomiale et est donc supposée peu efficace. Cependant, en pratique, il s'avère au contraire qu'il s'agit d'une bonne méthode [5].

La programmation linéaire est une classe spéciale de modèles de programmation mathématique (i.e. optimisation) dont le but est de déterminer les valeurs des variables de décision qui maximisent ou minimisent une fonction objectif linéaire, où les variables de décision sont soumises à des contraintes linéaires[6].

III.3 Méthodes approchées :

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes approchées ne procurent pas forcément une solution optimale, mais seulement une bonne solution (de qualité raisonnable) en un temps de calcul aussi faible que possible. Les méthodes approchées peuvent être classées en deux catégories : les heuristiques et les métaheuristiques [22].

III.3.1 Heuristiques :

Une heuristique est une règle empirique simple basée sur l'expérience. C'est une technique de calcul approchée qui exploite d'une façon satisfaisant le problème à optimiser et qui fournit une solution admissible, non nécessairement exacte, dans un temps polynomial pour un problème d'optimisation difficile. En d'autres termes, une heuristique est un algorithme qui sacrifie en partie, la qualité de la solution au sens purement mathématique pour accélérer le processus de résolution. Elle est également une stratégie de bon sens pour se déplacer intelligemment dans l'espace des solutions, afin d'obtenir une solution approchée, la meilleure possible, dans un délai de temps raisonnable. Elle est dédiée, généralement, à un problème bien particulier. Les heuristiques sont dépendantes du problème à résoudre, principalement dans le choix du voisinage (donc dans le déplacement dans l'espace des solutions)[2].

III.3.2 Méta-heuristiques :

Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs : "heuristique" qui vient du verbe "heuriskein" et qui signifie 'trouver' et le mot "meta" qui est un suffixe signifiant 'au-delà', 'dans un niveau supérieur.

Des heuristiques plus poussées ont été mises au point et qui y'ont données naissance à une nouvelle famille d'algorithmes : les métaheuristiques.

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

Le but d'une métaheuristique, est de réussir à trouver un optimum global. Pour cela, l'idée est à la fois de parcourir l'espace de recherche, et d'explorer les zones qui paraissent prometteuses ; mais sans être « piégé » par un optimum local.

Ainsi, les métaheuristicques sont des algorithmes qui utilisent plusieurs heuristiques et qui donnent des solutions plus proches de l'optimum en un temps raisonnable et une complexité minimale [2].

III.3.2.1 Métaheuristique à solution unique :

Les méthodes qui tentent itérativement d'améliorer une solution sont appelées méthodes de Recherche Locale (et parfois aussi méthodes de trajectoire). La méthode Tabou, le Recuit Simulé et la Recherche à Voisinages Variables sont des exemples typiques de méthodes de Recherche Locale. Ces méthodes construisent une trajectoire dans l'espace S des solutions en tentant de se diriger vers des solutions optimales[2].

Dans cette catégorie, on peut citer la méthode de recherche tabou (Tabu Search TS) et le Recuit Simulé.

A. Le Recuit Simulé :

L'algorithme du recuit simulé a été proposé par Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi. Son principe se base sur la procédure du recuit des métaux utilisée par les métallurgistes. Ces derniers chauffent à blanc le métal, puis ils laissent l'alliage se refroidir très lentement afin d'aboutir à un alliage sans défauts. En fait, les thermodynamiciens ont remarqué qu'une baisse brutale de la température d'un liquide entraîne une reproduction d'un optimum local, c'est à dire une structure amorphe. Alors qu'une baisse progressive de la température du liquide permet d'aboutir à un optimum global, c'est à dire une structure bien construite. C'est l'idée prise en considération par les métallurgistes qui savent que si le métal refroidit trop vite, il contiendra beaucoup de défauts microscopiques et s'il refroidit lentement ils obtiendront une structure bien ordonnée. La métaheuristique du recuit simulé s'inspire de l'algorithme de Métropolies [Métropolies et al, 1953], dont le principe (pour un problème de maximisation) peut être résumé comme suit :

- Entamer la recherche avec une solution initiale s
- Affecter une valeur initiale à la température T
- Calculer la fitness $f(s)$ de la solution initiale s
- Générer une solution s' voisine de s

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

- Calculer la fitness $f(s')$ de s'
- Calculer l'écart de qualité (fitness) entre la solution s et la solution s' comme suit :

$$\Delta(f) = f(s') - f(s)$$

- **Si** $\Delta(f) \geq 0$ **alors** $s \leftarrow s'$
- **Sinon** générer un nombre aléatoire $r \in [0,1]$;
- **Si** $r \leq \exp\left(\frac{\Delta f}{T}\right)$ **alors** $s \leftarrow s'$

Le recuit simulé est un algorithme basé sur la recherche à voisinage (recherche locale). C'est un algorithme simple, facile à implémenter et à adapter à un grand nombre de problèmes : traitement d'image, sac à dos, voyageur de commerce, ordonnancement, etc. Comparé avec la recherche locale simple, le RS permet de se sauver du piège de l'optimum local et d'offrir des solutions de bonne qualité comme il présente une souplesse d'intégration des contraintes liées au problème traité. En revanche, cet algorithme dispose d'un nombre important de paramètres (température initiale, paramètres liés à la fonction d'ajustement de la température, etc.) à ajuster. En outre, le RS est un algorithme lent surtout avec les problèmes de grande taille [5].

B. La Recherche Tabou :

La méthode Tabou a été développée par Glover et indépendamment par Hansen . Cette méthode fait appel à un ensemble de règles et de mécanismes généraux pour guider la recherche de manière intelligente à travers l'espace des solutions. Contrairement au recuit simulé qui génère aléatoirement une seule solution voisine $s' \in N(s)$ à chaque itération, la méthode Tabou examine un échantillon de solutions de $N(s)$ et retient la meilleure s' , même si s' est plus mauvaise que s .

La recherche Tabou ne s'arrête donc pas au premier optimum trouvé, mais elle peut entraîner des cycles, par exemple un cycle de longueur 2 : $s \rightarrow s' \rightarrow s \rightarrow s' \dots$ etc.

Pour empêcher ce type de cycle, on mémorise les k dernières configurations visitées dans une mémoire à court terme et on interdit tout mouvement qui conduit à une de ces configurations.

Cette mémoire est appelée la liste tabou qui est une des composantes essentielles de cette méthode. Elle permet d'éviter tous les cycles de longueur inférieure ou égale à k . La valeur de k dépend du problème à résoudre et peut éventuellement évoluer au cours de la recherche [11].

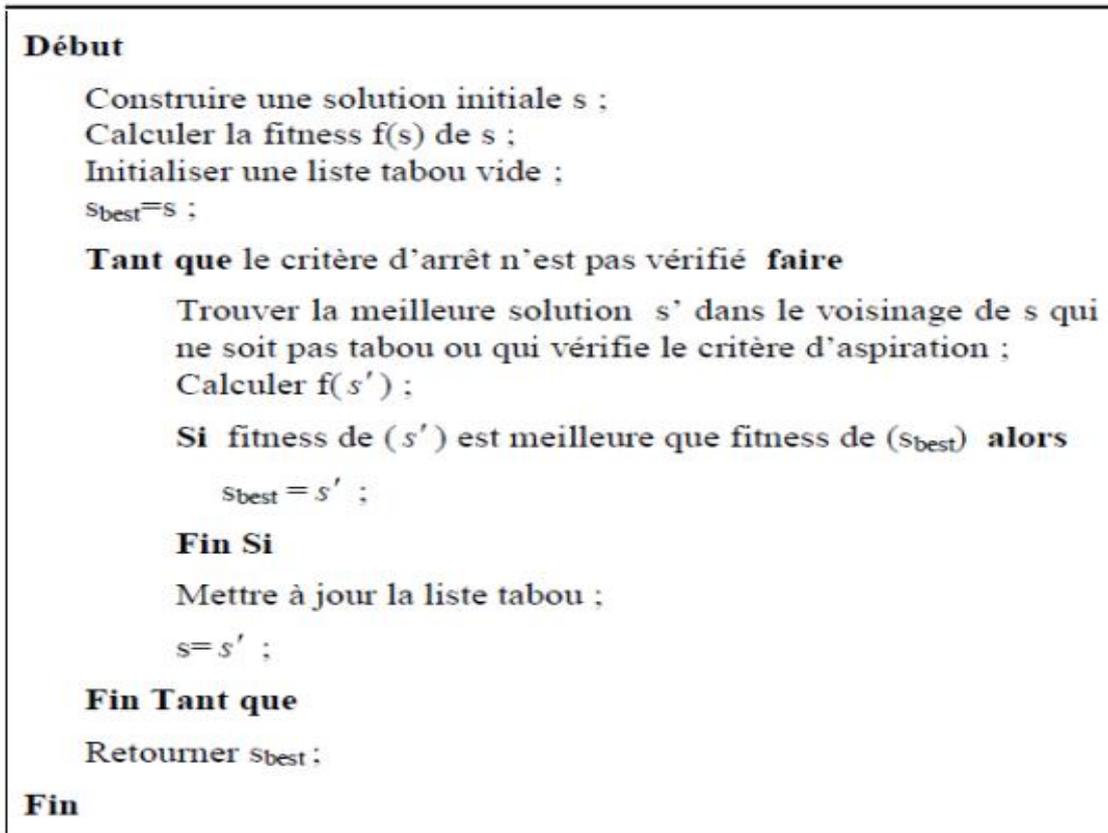


Figure III.3 : Schéma général de l'algorithme du Recherche Tabou (RT) [5].

III.3.2.2 Métaheuristique à population de solutions :

Les métaheuristicues à base de population de solutions débutent la recherche avec une panoplie de solutions. Elles s'appliquent sur un ensemble de solutions afin d'en extraire la meilleure (l'optimum global) qui représentera la solution du problème traité. L'idée d'utiliser un ensemble de solutions au lieu d'une seule solution renforce la diversité de la recherche et augmente la possibilité d'émergence de solutions de bonne qualité. Une grande variété de méthodes qui travaillent avec une population de solutions ont été proposées dans la littérature, les algorithmes génétiques et Les algorithmes de colonies de fourmis présentent les exemples les plus connus de ces méthodes [5].

A. Les algorithmes génétiques :

L'algorithme génétique représente une célèbre métaheuristique évolutionnaire. Il a été proposé par John Holland en 1975. L'algorithme génétique s'inspire des mécanismes biologiques tels que les lois de Mendel et la théorie de l'évolution proposée par Charles Darwin. Son processus de recherche de solutions à un problème donné imite celui des êtres vivants dans leur

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

évolution. Il utilise le même vocabulaire que celui de la biologie et la génétique classique, on parle donc de: gène, chromosome, individu, population et génération[12].

Le processus de recherche de l'algorithme génétique est fondé sur les opérateurs suivants:

- **Un opérateur de codage des individus:** Il permet la représentation des chromosomes représentant les individus.
- **Un opérateur d'initialisation de la population:** Il permet la production des individus de la population initiale. Malgré que cet opérateur ne s'intervient qu'une seule fois et au début de la recherche, mais il joue un rôle non négligeable dans la convergence vers l'optimum global. En fait, le choix de la population initiale peut rendre la recherche de la solution optimale du problème traité plus facile et plus rapide.
- **Un opérateur de sélection:** Il permet de favoriser la reproduction des individus qui ont les meilleures fitness (i.e. les meilleures qualités).
- **Un opérateur de croisement:** Il permet l'échange des gènes entre parents (deux parent en général), pour créer 1 ou deux enfants en essayant de combiner les bonnes caractéristiques des parents. Le but de cet opérateur est la création de nouveaux individus en exploitant l'espace de recherche.
- **Un opérateur de mutation:** Il consiste à modifier quelques gènes des chromosomes des individus, dans le but d'intégrer plus de diversité au sein du processus de la recherche[9].

B. Les colonies de fourmis :

Les algorithmes de colonies de fourmis forment une classe des métaheuristiques récemment proposée pour des problèmes d'optimisation difficile par Dorigo [DOR96], Ces algorithmes s'inspirent des comportements collectifs de dépôt et de suivi de piste observés dans les colonies de fourmis. Une colonie d'agents simples (les fourmis) communiquent indirectement via des modifications dynamiques de leur environnement (les pistes de phéromones) et construisent ainsi une solution à un problème en s'appuyant sur leur expérience collective.

Les principes de fonctionnement de la métaheuristique de colonie de fourmis sont comme suit : le problème est représenté par un jeu de solutions, une fonction objective assignant une valeur à chaque solution et un jeu de contraintes. L'objectif est de trouver l'optimum global de

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

la fonction objectif satisfaisant les contraintes. Les différents états du problème sont caractérisés comme une séquence de composants.

Les fourmis construisent des solutions en se déplaçant sur un graphe $G=(C,L)$, où les nœuds sont les composants de C et où l'ensemble L connecte les composants de C . les contraintes du problème sont implémentées directement dans les règles de déplacement des fourmis (soit en empêchant les mouvements qui violent les contraintes, soit en pénalisant de telles solutions)[22].

C. L'optimisation par essaim particulaire :

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995[12]. L'idée directrice de cette méthode est de simuler le comportement collectif des oiseaux à l'intérieur d'une nuée : leur capacité à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction, tout en restant en une formation optimale[21].

C.1 Principe de l'algorithme PSO :

Dans cet algorithme, les solutions candidates d'une population, appelées particules, coexistent et évoluent simultanément en se basant sur le partage des connaissances avec les particules voisines. Alors qu'il volait à travers l'espace de recherche, chaque particule génère une solution utilisant sa vectrice vitesse. Chaque particule modifie sa vitesse pour trouver une meilleure solution (position) en appliquant sa propre expérience de vol (c.-à-d. mémoire ayant la meilleure position trouvée dans les vols précédents) et l'expérience de particules voisines (c.-à-d. meilleure solution trouvée de la population)[12].

Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes :

- **Une composante d'inertie:** la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- **Une composante cognitive :** la particule tend à se fier à sa propre expérience et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- **Une composante sociale :** la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint collectivement par l'essaim[12].

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

Le principe de la méthode d'essaim de particule est résumé par la figure II.5

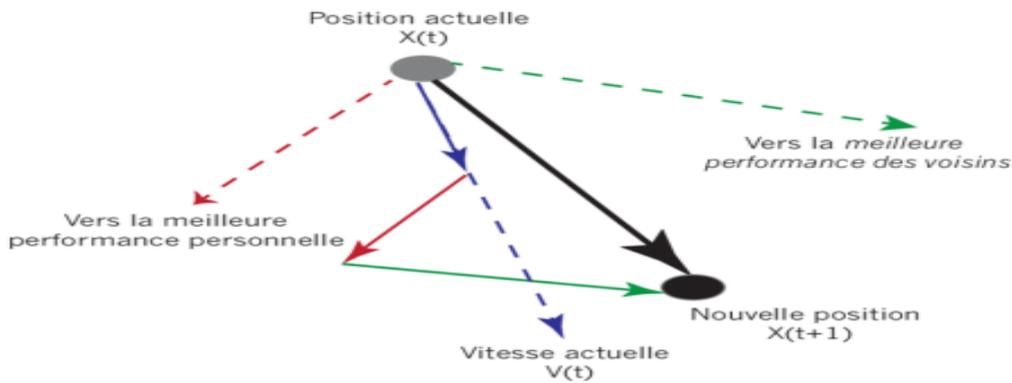


Figure III.4 : Déplacement d'une particule[12].

Le déplacement de ses animaux en essaim est complexe, sa dynamique obéit à des règles et des facteurs bien spécifiques qu'il s'agit de cerner :

- Chaque individu dispose d'une certaine intelligence « limitée » (qui lui permet de prendre une décision).
- Chaque individu doit connaître sa position locale et disposer d'information locale de chaque individu se trouvant dans son voisinage.
- Obéir à ces trois règles simples, « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « voler à la même vitesse ». Tous ses facteurs et règles sont indispensables pour le maintien de la cohésion dans l'essaim, ceci par l'adoption d'un comportement collectif complexe et adaptatif [12].

C.2 Formalisation [3]:

L'essaim de particules est constitué de n particules et la position de chaque particule représente une solution dans l'espace de recherche. Les particules changent d'état selon les trois principes suivants :

- Garder son inertie.
- Changer d'état en fonction de sa position la plus optimiste.
- Changer d'état selon la position la plus optimiste du groupe.

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

La position de chaque particule est affectée à la fois par la position la plus optimiste lors de son mouvement (expérience individuelle) et la position de la particule la plus optimiste dans ses environs (expérience globale). La mise à jour de la position $x(t)$ et la vitesse $v(t)$ d'une particule p est représentée par les équations (1) et (2) :

$$V(t + 1) = \omega V(t) + C_1 r_1 (pb(t) - X(t)) + C_2 r_2 (pg(t) - X(t)) \quad (1)$$

$$X(t + 1) = X(t) + V(t + 1) \quad (2)$$

Où ω est l'inertie, C_1 et C_2 sont des coefficients constants fixés par l'utilisateur, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires dans la plage $[0, 1]$, tirés à chaque itération, $pg(t)$ est la meilleure solution trouvée jusqu'à l'instant t et $pb(t)$ est la meilleure solution trouvée par la particule p .

C.3 Configuration des paramètres :

Il existe plusieurs paramètres qui interviennent et influencent la performance de la méthode PSO.

Parmi les paramètres qui rentrent en ligne de compte citons :

- La dimension du problème ;
- Le nombre des particules ;
- La disposition des particules ;
- Les coefficients de confiance ;
- La vitesse maximale ;
- Le facteur d'inertie ;
- La notion du voisinage ;
- Le critère d'arrêt.

Nous allons par la suite nous intéresser plus particulièrement aux trois derniers paramètres [23].

✓ Le coefficient d'inertie [23]:

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

Le coefficient d'inertie w a été introduit par Y.SHI pour contrôler l'influence de la direction de la particule sur le déplacement futur. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration).

La valeur de w est généralement constante, mais peut être variable dans certains cas, une grande valeur de w est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc d'exploration globale de l'espace de recherche. La détermination de la meilleure valeur de ce paramètre dans le cas pratique se fait à travers des expérimentations numériques.

✓ La notion du voisinage :

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Le voisinage d'une particule représente avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe deux principaux types de voisinages :

Le voisinage géographique : ce type de voisinage représente la proximité géographique, c'est la notion la plus naturelle du voisinage pour les essaims particulaires, les voisins sont considérés comme les particules les plus proches. Cependant, à chaque itération, les nouveaux voisins doivent être recalculés à partir d'une distance prédéfinie dans l'espace de recherche. C'est donc un voisinage dynamique qu'il convient de définir et d'actualiser à chaque itération. C'est ce type de voisinage qui a été retenu dans notre approche.

Le voisinage social : ce type de voisinage représente la proximité sociale, les voisinages ne sont plus l'expression de la distance mais l'expression de l'échange d'informations, les voisins sont définis à l'initialisation et ne sont pas modifiés par la suite. Une fois le réseau des connexions sociales établi, il n'y a pas besoin de le réactualiser. C'est donc un voisinage statique [23].

La topologie du voisinage constitue la structure du réseau social et définit avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées (voir figure III.5) [12].

(a) Topologie en étoile : chaque particule est reliée à toutes les autres, l'optimum du voisinage est l'optimum global.

(b) Topologie en anneau: chaque particule est reliée à n particules ($n = 3$ en général).

(c) **Topologie en rayon** : les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale.

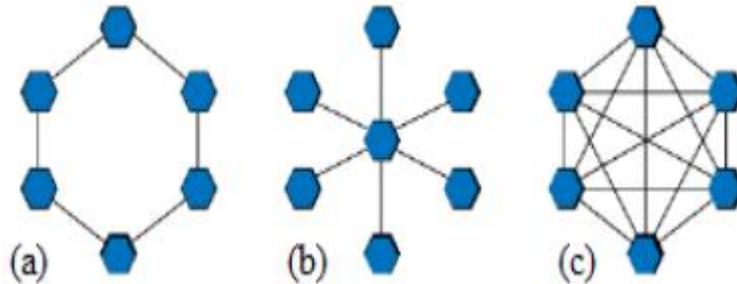


Figure III.5: Différent type de topologie de voisinage pour essaim particulaire [12].

✓ Le critère d'arrêt [12]

Le critère d'arrêt sert à déterminer le moment où l'on considère que la solution trouvée est d'assez bonne qualité pour être recevable. On peut par exemple :

- Fixer un nombre maximum d'itérations.
- Après un nombre fixe d'étapes n'ayant pas amélioré la solution s .
- Fixer un temps limite après lequel la recherche doit s'arrêter.

C.4 Algorithme PSO [12]:

Algorithme de base :

L'algorithme de base le plus simple de l'algorithme PSO est donné ci-dessous, où g la meilleure position connue de l'essaim et $f(x)$ la fonction coût.

Algorithme 2 : Algorithme PSO :

Début

Pour chaque particule :

On initialise sa position

On initialise sa meilleure position p connue comme étant sa position initiale

Si $f(p) < f(g)$

On met à jour la meilleure position de l'essaim

Fin si

On initialise la vitesse de la particule

Fin pour

Tant que le critère d'arrêt n'est pas vérifié (on n'a pas atteint l'itération maximale) :

Pour chaque particule i :

Chapitre III : Méthodes de résolution des problèmes d'emplois du temps

On tire aléatoire r_1 et r_2

On met à jour la vitesse de la particule selon l'équation (1.1)

On met à jour la position x_i selon l'équation (1.2)

Si $f(x_i) < f(p_i)$

On met à jour la meilleure position de la particule

Fin si

Si $f(p_i) < f(g)$

On met à jour la meilleure position de l'essaim

Fin si

Fin pour

Fin tant que

g est l'optimum

Fin

III.4 Conclusion :

A travers ce chapitre, Nous avons pu voir qu'un grand nombre de méthodes d'optimisation existe pour la résolution des problèmes combinatoires en particulier le problème d'emploi du temps. Où on distingue deux grandes familles : Les méthodes exactes et les méthodes approchées, nous avons présenté avec plus de détails la méthode de séparation et évaluation et la méthode essaim particulière que nous allons appliquer pour la résolution de notre problème. Leur adaptation sera abordée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résolution du problème

Chapitre IV : Résolution du problème

IV.1 Introduction :

Cette contribution répond à un problème qui appartient à la vaste catégorie des problèmes d'optimisation combinatoire à savoir le problème d'emploi du temps. Notre problème consiste à élaborer un emploi du temps pour différentes promotions en assurant la répartition équitable des tâches sur l'ensemble des enseignants, tout en respectant les contraintes posées par les gestionnaires de l'école, dans le but de construire des calendriers réalisables et efficaces.

Plusieurs méthodes d'optimisation alternatives ont été utilisées pour la résolution de ce type de problème. De notre part, nous avons proposé une résolution par une méthode exacte itérative et une méthode approchée à savoir la méthode d'essaim de particules.

IV.2 Résolution du problème par la méthode exacte Branch and Bound (B&B) :

Le Branch and Bound (B&B) est une méthode algorithmique utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Dans ce cas, il est utilisé pour trouver l'emploi du temps optimal pour deux promotions, en tenant compte des contraintes imposées aux cours et aux enseignants (voir chapitre II). L'algorithme explore de manière systématique toutes les solutions possibles, mais utilise des bornes pour éliminer les solutions qui ne peuvent pas être optimales, réduisant ainsi l'espace de recherche.

IV.3 Adaptation de l'algorithme de Branch and Bound :

Algorithme de Branch and Bound :

Étape 1: Initialisation

- Démarrer l'algorithme par un emploi du temps vide
- Créer un nœud initial avec pénalité = 0 et un niveau 0 (indiquant qu'aucun cours n'a encore été placé).

Étape 2: Exploration des Nœuds

- Explorer les nœuds un par un, en commençant par le nœud initial.
- Vérifier à chaque itération :

Si tous les cours ont été placés alors comparer la pénalité de ce nœud avec la meilleure pénalité trouvée.

Sinon, générer de nouveaux nœuds en ajoutant des cours à l'emploi du temps actuel .

Étape 3: Calcul de la Pénalité

La fonction de fitness calcule la pénalité pour chaque emploi du temps. Elle inclut plusieurs contraintes pour s'assurer que l'emploi du temps respecte les règles définies.

Étape 4: Élagage

Éliminer tous les nœuds qui ont une pénalité supérieure à la meilleure pénalité trouvée. Cela permet de ne pas explorer des branches de l'arbre de recherche qui ne peuvent pas conduire à une solution optimale.

Étape 5 : Répéter le processus

À partir de l'étape 2 Tant que le critère d'arrêt (pénalité =0) n'est pas satisfait.

IV.4 Adaptation de l'algorithme PSO(1) pour la résolution du problème [18]:

Afin de résoudre notre problème, nous allons procéder de la manière suivante.

1. Particule (ou Solution) :

- Dans le contexte de l'algorithme PSO, une particule représente une solution candidate à un problème d'optimisation.
- Dans notre problème d'ordonnement de cours, la particule équivaut à l'emploi du temps initial généré aléatoirement.

2. Vitesse :

- En PSO, la vitesse représente la modification appliquée à la solution lors de l'optimisation.

- Dans notre algorithme, la vitesse pourrait être interprétée comme les modifications appliquées à l'emploi du temps initial pour trouver une meilleure solution. Par exemple, changer l'instructeur affecté à un cours, déplacer un cours à un autre jour, etc.

3. Meilleure position personnelle (ou Meilleur individu) :

- Chaque particule dans PSO garde en mémoire sa meilleure position personnelle, c'est-à-dire la meilleure solution qu'elle a trouvée jusqu'à présent.
- Dans notre algorithme, la meilleure position correspond à l'emploi du temps avec la pénalité la plus faible rencontrée jusqu'à présent par la particule.

4. Meilleure position globale (ou Meilleure solution globale) :

- Il s'agit de la meilleure solution rencontrée par l'ensemble des particules de l'essaim.
- Dans notre algorithme, la meilleure position globale correspond à l'emploi du temps avec la pénalité la plus faible rencontrée par l'algorithme dans son ensemble.

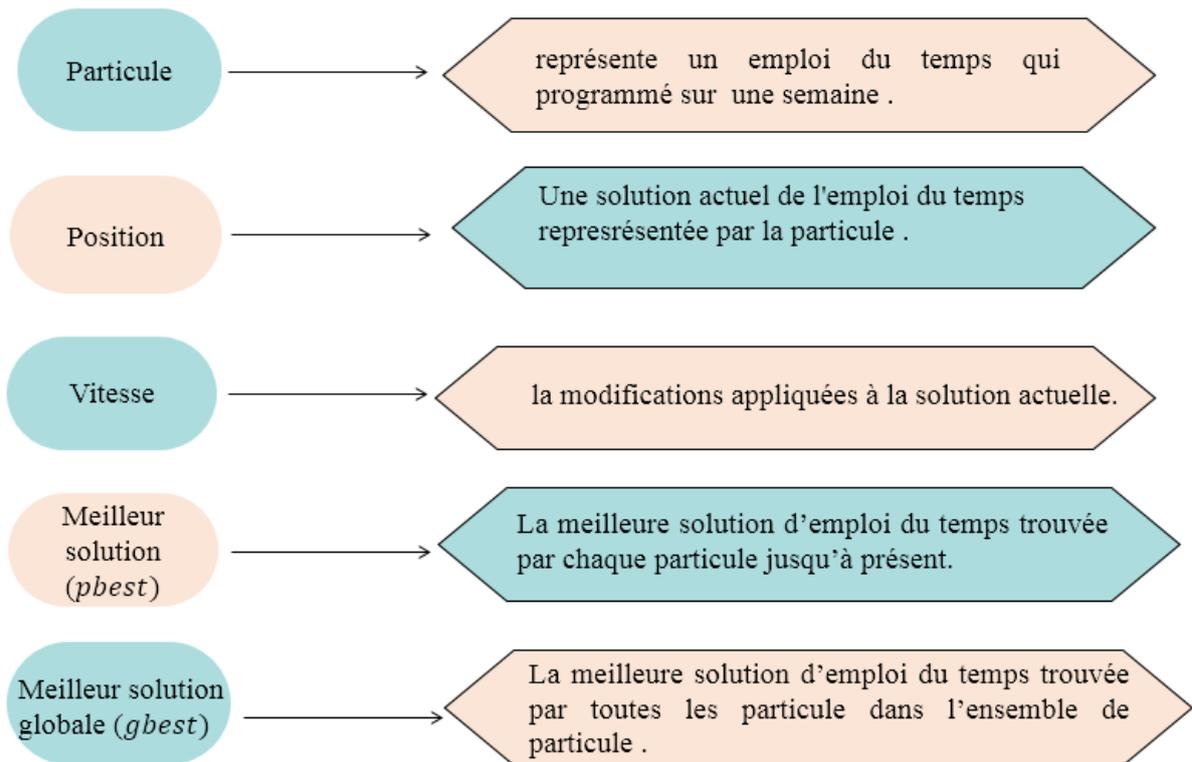


Figure IV.1: schéma représentatif de notre méthode de résolution PSO (1) .

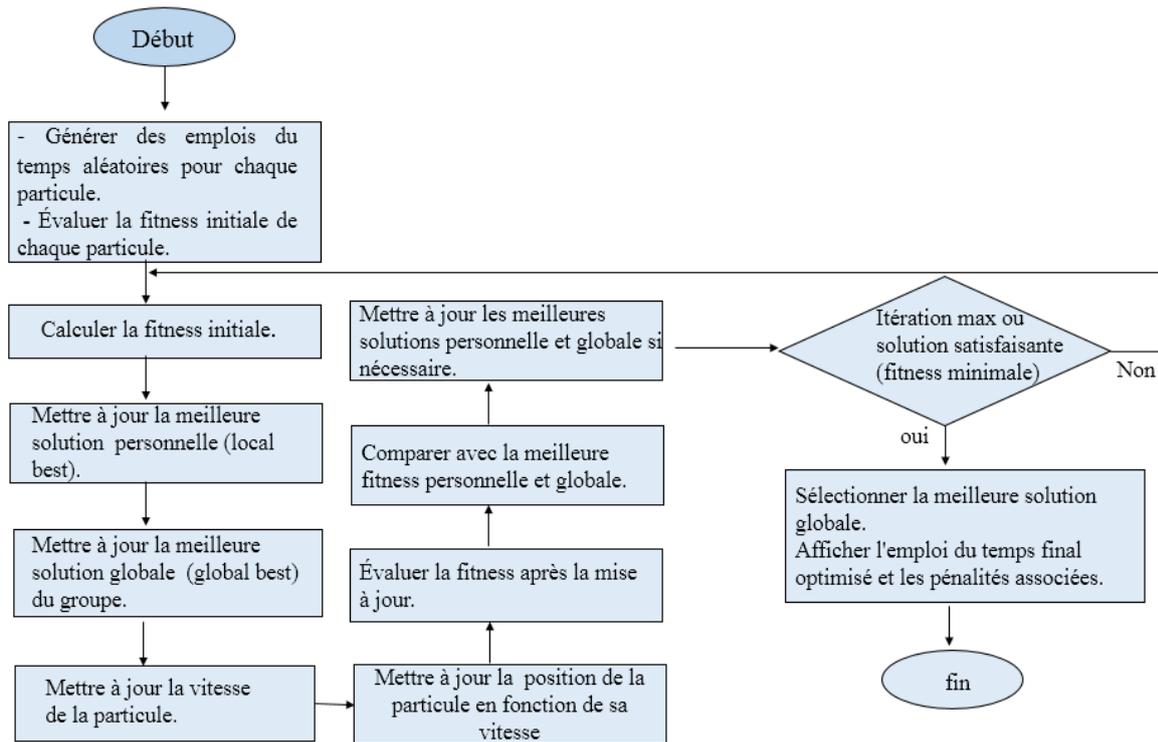


Figure IV.2 : Schéma représente l’adaptation de l’algorithme PSO (1) pour le problème d’emploi du temps.

IV.5 l’algorithme PSO (1) :

1. Initialisation :

- Initialiser les positions des particules (x_i) et les vitesses (v_i) aléatoirement dans l'espace de recherche.
- Initialiser les meilleures positions personnelles (p_{best_i}) pour chaque particule comme étant leurs positions initiales.
- Initialiser la meilleure position globale (g_{best_i}) comme étant la meilleure position parmi toutes les particules.

2. Mise à jour des particules :

- Mettre à jour la vitesse : $[v_{i(t+1)} = w \cdot v_{i(t)} + c_1 \cdot rand() \cdot (p_{best_i} - x_i) + c_2 \cdot rand() \cdot (g_{best} - x_i)]$ où (w) est le poids d'inertie, (c_1) et (c_2) sont des coefficients d'accélération, avec $c_1 = 1.5, c_2 = 1.5, w = 0.7$.

- Mettre à jour la position : [$x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)}$]

3. Mise à jour des meilleures positions personnelles et globales :

- Si ($f(x_{i(t+1)}) < f(p_{best_i})$), mettre à jour (p_{best_i}) à ($x_{i(t+1)}$) pour la particule (i).

- Mettre à jour (g_{best}) à la meilleure position parmi toutes les valeurs (p_{best_i}).

4. Répéter :

- Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit atteinte (par exemple, nombre maximal d'itérations atteint ou critères de convergence atteints).

Dans ces équations, ($f(x_i)$) représente la valeur de la fonction objective à la position (x_i), que l'algorithme cherche à minimiser ou à maximiser en fonction du problème d'optimisation.

IV.6 Fonctionnement de l'Algorithme PSO (1) :

- **Initialisation** : Les emplois du temps initiaux sont générés de manière aléatoire pour chaque particule.

- **Optimisation** : À chaque itération, les emplois du temps sont évalués et ajustés pour minimiser la pénalité totale, en tenant compte des contraintes spécifiées (voir chapitre II).

- **Convergence** : L'algorithme converge vers une solution optimale où les emplois du temps respectent au mieux toutes les contraintes éducatives et de disponibilité des formateurs (voir chapitre II).

IV.7 L'Optimisation Quotidienne PSO (2) [14] :

1. Initialisation de la Population :

L'optimisation quotidienne commence par l'initialisation d'un ensemble de particules. Chaque particule représente un emploi du temps possible pour un jour spécifique. Par exemple, pour un jour donné, les particules peuvent ressembler à ceci :

1 - Particule :

8h-10h	10h-12h	13h-15h	15h-17h
Course A	Course B	Course C	Course D

2 - Particule 2 :

8h-10h	10h-12h	13h-15h	15h-17h
Course B	Course D	Course A	Course C

Chaque emploi du temps est généré en attribuant des cours aux créneaux horaires disponibles en fonction de la disponibilité des instructeurs et des contraintes initiales.

2. Calcul de la Fitness (Aptitude) :

Chaque emploi du temps (chaque jour) est évalué à l'aide d'une fonction de fitness qui calcule une pénalité basée sur les contraintes de planification.

Exemples de contraintes (voir chapitre II) :

- Contrainte de sessions consécutives : Éviter des sessions non consécutives pour les instructeurs à temps plein et partiel.
- Charge de travail quotidienne : Assurer que les instructeurs à temps plein ne dépassent pas 4 sessions par jour.
- Préférences des instructeurs : Respecter les disponibilités des instructeurs à temps partiel.
- Séparation des sessions TP et EPS : Éviter de planifier des sessions de TP et EPS le même jour pour le même instructeur.

3. Mise à Jour des Particules :

Les particules sont mises à jour en fonction de leur position actuelle, de la meilleure position qu'elles ont atteinte (personnelle), et de la meilleure position atteinte par l'ensemble de l'essaim (globale). Cette mise à jour est guidée par les équations suivantes :

- Vitesse : La vitesse de chaque particule est ajustée pour diriger la particule vers la meilleure solution.
- Position : La position de la particule est mise à jour en fonction de la nouvelle vitesse.

La nouvelle position peut être interprétée comme un nouvel emploi du temps où les cours sont réattribués aux créneaux horaires en fonction des ajustements de la vitesse.

4. Ajustement Cours par Cours :

Pendant l'optimisation, chaque cours dans l'emploi du temps est réexaminé et réattribué en fonction des nouvelles positions des particules. Par exemple, si une particule détermine qu'un cours "A" devrait être déplacé de 8h-10h à 10h-12h pour minimiser la pénalité, cette modification est effectuée. Voici un processus type :

1. Sélection du Cours : Un cours spécifique est sélectionné pour être réattribué.
2. Evaluation des Créneaux Horaires : Chaque créneau horaire possible est évalué en termes de pénalité.
3. Réattribution : Le cours est réattribué au créneau horaire qui minimise la pénalité.

5. Convergence et Résultat Final :

Ce processus de mise à jour et de réattribution se poursuit pendant un nombre d'itérations spécifié. Le résultat final est l'emploi du temps optimisé pour chaque jour avec la pénalité la plus faible possible.

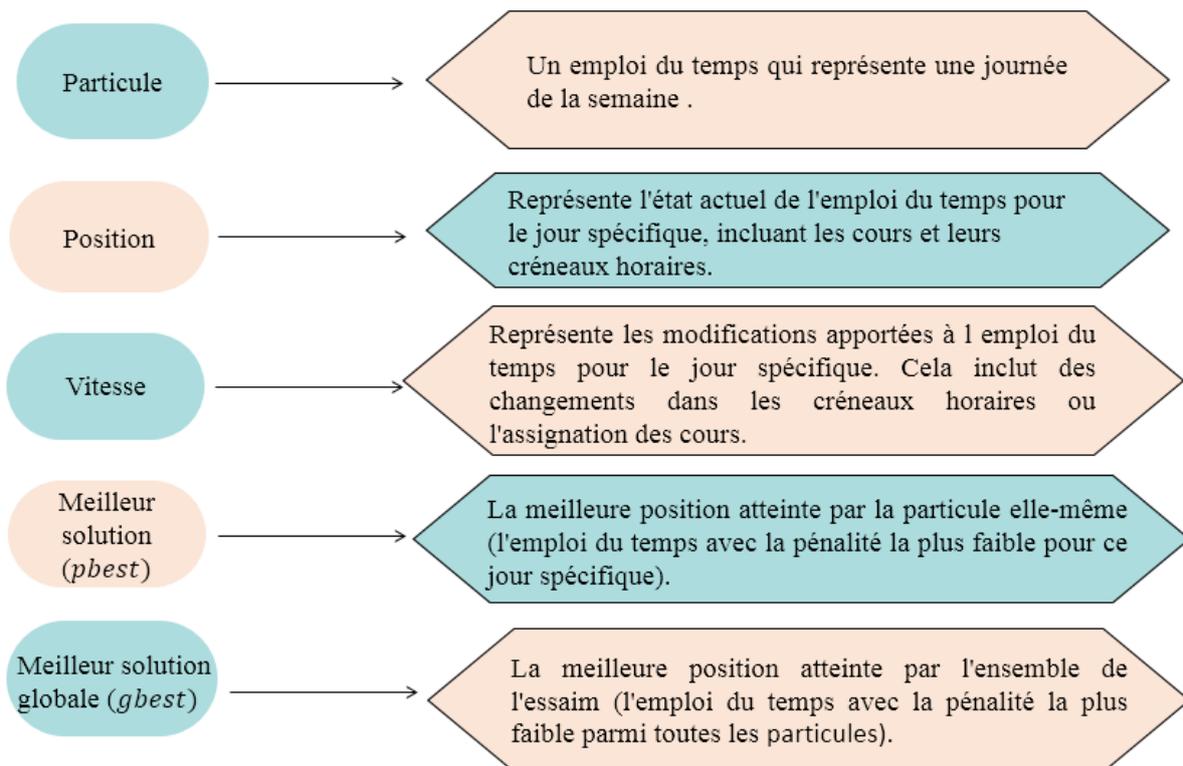


Figure IV.3: Schéma représentatif de la méthode de résolution PSO (2) .

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré deux Méthodes distinctes pour résoudre le problème d'emploi du temps. Tout d'abord, nous avons étudié la méthode exacte "branch and bound", qui consiste à diviser le problème en sous-problèmes plus simples pour en garantir la résolution optimale. En parallèle, nous avons examiné l'approche approximative de l'optimisation par essai particulière, une méthode heuristique qui recherche une solution satisfaisante en simulant le comportement collectif des particules.

Nous avons détaillé l'adaptation de chaque méthode et présenté leurs algorithmes respectifs. Dans le chapitre suivant nous allons procéder à une comparaison détaillée des deux méthodes, mettant en lumière leurs forces, leurs limitations et leur performance relative dans divers scénarios de planification d'emplois du temps.

CHAPITRE V

Implémentation et résultats

Chapitre V : Implémentation et résultats

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous plongeons dans l'aspect concret de notre étude en explorant l'implémentation des méthodes discutées précédemment et en examinant les résultats obtenus. En premier lieu, nous détaillerons les choix techniques effectués lors du développement. Par la suite, nous analyserons les données et présenterons les résultats obtenus.

Ce chapitre offre ainsi un aperçu détaillé de la mise en œuvre pratique de notre étude et des conclusions expérimentales qui en découlent.

V.2 Choix du langage de programmation

Nous avons opté pour le langage de programmation Python, avec une attention particulière portée à PyCharm 2022.1.3 (IDE).

PyCharm est un environnement de développement intégré (IDE) spécifiquement conçu pour le langage de programmation Python. Il est développé par JetBrains et offre des fonctionnalités telles que l'analyse de code, le débogage, l'intégration du contrôle de version, ainsi que le support pour différents frameworks de développement web. PyCharm est largement utilisé par les développeurs Python en raison de sa facilité d'utilisation et de son écosystème de plugins étendu.

- **Anaconda**

Anaconda est une distribution open source de haute performance basée sur Python qui comprend plus de 100 packages Python. Elle dispose des bibliothèques scientifiques directement installées (Numpy, Pandas, scipy, etc.) et fournit aux utilisateurs la possibilité de choisir parmi plusieurs IDE (Integrated Development Environment) tels que Jupyter Notebook, Spyder, etc. Grâce aux fonctionnalités qu'elle offre, Anaconda est le moyen le plus simple d'exercer la science des données et l'apprentissage automatique [7].

- **Numpy**

Numpy est la principale bibliothèque du calcul scientifique en Python. Elle contient un large nombre de fonctions mathématiques, algébriques et de transformations [7].

- **Spyder**

Spyder est un environnement scientifique gratuit et open source écrit en Python, pour Python, et conçu par et pour les scientifiques, les ingénieurs et les analystes de données. Il offre

une combinaison unique des fonctionnalités avancées d'édition, d'analyse, de débogage et de profilage d'un outil de développement complet avec l'exploration de données, l'exécution interactive, l'inspection approfondie et les magnifiques capacités de visualisation d'un progiciel scientifique [7].

- **Tkinter**

Tkinter est la bibliothèque d'interface graphique standard pour Python, aide à créer des applications graphiques facilement et en un temps raisonnable[7].

- **Matplotlib**

Matplotlib est une bibliothèque open-source de visualisation de données pour le langage-python. Elle est utilisée pour créer des graphiques et des figures de haute qualité (33). Nous l'avons utilisé pour afficher les résultats obtenus sous forme de courbes afin de mieux les visualiser [7].

V.3 Machines utilisées :

Machine 1 :

- Processeur : Intel(R) Core(TM) i5-6300U CPU @ 2.40GHz 2.50 GHz.
- Mémoire RAM installée : 8,00 Go.
- ID de produit : 00331-10000-00001-AA364.
- Type du système : Système d'exploitation 64 bits, processeur x64.

Machine 1 :

- Processeur : pentium(R) Dual-core CPU T4400 @ 2.20 GHz .
- Mémoire RAM installée : 2 00 Go.
- ID de produit : 00371-OEM-899671-00004.
- Type du système : Système d'exploitation 64 bits.

V.4 Expérience numérique :

Nous allons illustrer nos résultats en adaptant deux instances réels fournies par l'école technique de Blida

Les données des instances sont représentées dans les tableaux suivantes :

Chapitre V : Implémentation et résultats

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Ramdani	Legislation	1
Bedrani	Api	2
Taibi	Securite	1
Sidi achour	Techno	4
Moulay	Secourisme	1
Hammoda	Expression	2

Table V.1 : Liste des formateurs permanents pour la promotion 1.

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Belouchi	Communication	2
Boumaza	Tp	4
Hamdi	Rel clientèle	1
Menacer	Cartographe	1
Belhadji	Eps	1

Table V.2 : liste des formateurs vacataires pour la promotion 1.

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Ramdani	mesure	1
Bedrani	electrotechnique	2
Taibi	Equipement	1
Sidi achour	Electronique	4
Moulay	Electricité	1
Hammoda	Chimie	2

Table V.3: Liste des formateurs permanents pour la promotion 2.

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Belouchi	Documentation	2
Boumaza	Tp	4
Hamdi	Exploitation	1
Menacer	gaz	1
Belhadji	Eps	1

Table V.4 : Liste des formateurs vacataires pour la promotion 2.


```

Final Timetable Promo 1:
Jour      8h-10h      10h-12h      13h-15h      15h-17h
-----  -
Dimanche
Lundi     securisme
Mardi     EPS           techno
Mercredi  API           TP
Jeudi     securite      expression   communication  legislation
Vendredi  rel clientele  cartographie
Samedi
Total Penalty Promo 1: 0

```

Figure V.4 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 1.

Pour la seconde Promotion :

```

# Example data for the second promotion
courses_promo2 = ['EPS', 'mesure', 'electrotechnique', 'equipment', 'electronique', 'electricite', 'chimie']
part_time_instructors_promo2 = {
    'Belouchi': {'Dimanche': [(10, 12)], 'Mardi': [(15, 17)], 'Jeudi': [(15, 17)]},
    'Boumaza': {'Lundi': [(10, 12)], 'Vendredi': [(10, 12)]},
    'Hamdi': {'Dimanche': [(15, 17)], 'Mercredi': [(13, 15)], 'Jeudi': [(8, 10)]},
    'Menacer': {'Mardi': [(15, 17)]},
    'Belhadji': {'Mercredi': [(10, 12)]}
}

full_time_instructors_promo2 = {
    'Ramdani': ['mesure'],
    'Berdrani': ['electrotechnique'],
    'Taibi': ['equipment'],
    'Sidi_achour': ['electronique'],
    'Moulay': ['electricite'],
    'Hammouda': ['chimie']
}

```

Figure V.5 : Disponibilité des formateurs.

```

Final Timetable Promo 2:
Jour      8h-10h      10h-12h      13h-15h      15h-17h
-----  -
Dimanche
Lundi     electrotechnique  electronique  gaz
Mardi     EPS              mesure       chimie
Mercredi  TP
Jeudi     equipment        documentation  exploitation
Vendredi  electricite
Samedi
Total Penalty Promo 2: 0

```

Figure V.6 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 2.

V.6 Le résultat obtenu par la méthode exacte branch and bound :

L'emploi du temps généré par la méthode exacte « Branch and Bound » à partir de la matrice de disponibilité est représenté dans le tableau suivant avec une pénalité égale à 0.

La promotion 1 :

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Secourisme			
Mardi	Eps	Techno		
Mercredi	Api	Tp		
Jeudi	Sécurité	Expression	Communication	Législation
Vendredi	Rel Clientèle	Cartographie		
Samedi				

Table V.5 : Emploi du temps obtenu par une méthode exacte itérative pour la promotion 1.

La promotion 2 :

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Electrotechnique	Electronique	Gaz	
Mardi	Eps	Mesure	Chimie	
Mercredi	Tp			
Jeudi	Equipment	Documentation	Exploitation	
Vendredi	Electricité			
Samedi				

Table V.6 : Emploi du temps obtenu par une méthode exacte itérative pour la promotion 2.

L'algorithme de branch and bound a été appliqué à la génération d'emplois du temps mais son temps d'exécution s'est avéré très long. Bien que la taille du problème étudié (seulement 11 cours par promotion), ce qui est bien est inférieur à la taille réelle, toutes les contraintes ont été satisfaites, résultant optimales respectant toutes les contraintes. Cependant, cette méthode n'est pas efficace pour notre problème, nous sommes donc obligés de le résoudre en utilisant

une méthode métaheuristique telle que le PSO (Particule Swarm Optimization), qui offre un meilleur compromis entre qualité de solution et temps de calcul.

V.7 Codage des particules (Optimisation par essaim particulaire PSO) :

Pour chaque promotion, nous avons exécuté l'algorithme PSO en initialisant 50 particules avec des emplois du temps aléatoires. Chaque particule est évaluée en fonction de la fonction objectif, qui calcule plusieurs pénalités basées sur des contraintes spécifiques telles que le nombre de sessions des enseignants à temps plein par jour, la répartition des cours des enseignants à temps partiel dans une même journée, et l'absence de sessions consécutives pour les enseignants. Nous avons ajusté les vitesses et les positions des particules pour minimiser ces pénalités en tenant compte des meilleures solutions trouvées à chaque itération. Le processus itératif se poursuit jusqu'à ce que la meilleure solution globale soit trouvée ou que le nombre maximum d'itérations soit atteint.

En appliquant cette approche, nous obtenons des emplois du temps optimisés pour chaque promotion qui respectent les contraintes spécifiées tout en minimisant les pénalités associées.

- Fonction de Fitness

La fonction de fitness évalue chaque emploi du temps généré par une particule en fonction de la violation des contraintes définies, tant les contraintes dures que les contraintes douces. Le but est de minimiser cette valeur pour obtenir un emploi du temps optimal qui respecte au mieux toutes les contraintes.

Cette fonction évalue les emplois du temps en fonction des pénalités accumulées pour chaque type de violation de contrainte. Les contraintes spécifiques à votre problème sont intégrées dans les boucles correspondantes, et vous pouvez ajouter d'autres contraintes spécifiques selon les besoins.

```
def fitness_function(timetable, courses, part_time_instructors, full_time_instructors, weights):
    penalties = [0] * len(weights)

    # Constraint 1: Full-time instructors should not exceed 4 sessions in a day
    for day, courses in timetable.items():
        full_time_sessions = sum(1 for _, instructor in courses if instructor in full_time_instructors)
        if full_time_sessions > 4:
            penalties[0] += 1
```

Figure V.7: Fonction de Fitness.

Chapitre V : Implémentation et résultats

Dans notre approche utilisant l'algorithme PSO pour la génération d'emplois du temps, nous avons adopté une méthode itérative pour créer un emploi du temps réalisable, jour par jour.

- Exécution pour chaque promotion

- Le code est utilisé pour deux promotions distinctes (`promo1` et `promo2`), chacune avec ses propres cours, formateurs à temps partiel et à temps plein, ainsi que des poids de contrainte spécifiques.

V.8 Le résultat obtenu par la méthode essaim particulaire :

La promotion 1 :

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche	Techno			
Lundi	Sécurité	Communication	Communication	TP
Mardi	Cartographie	Législation	Techno	
Mercredi	Rel clientèle			
Jeudi	Eps	Expression	Tp	
Vendredi	Expression	Secourisme	Tp	Techno
Samedi	Api	Api	Tp	

Table V.7: Emploi du temps initial pour la promotion 1.

L'emploi du temps initial est généré aléatoirement. Nous remarquons la présence des cas de chevauchement comme le module techno enseigné par le formateur permanent Sidi achour qui a été affecté dans la première journée dans le premier créneau alors que la matrice de disponibilité indique qu'il est occupé dans ce créneau.

Le module cartographie enseigné par le formateur vacataire Menacer qui a été affecté dans la troisième journée dans le premier créneau alors que la matrice de disponibilité indique qu'il est occupé dans ce créneau. Cet emploi du temps est donc non acceptable.

Le meilleur emploi du temps généré par la méthode essaim particulaire tel que chaque unité de temps a été modifiée en contrôlant les contraintes à partir de l'emploi du temps initial et la matrice de disponibilité est représentée dans le tableau suivant avec une pénalité égale à 15

▪ **Meilleur emploi du temps pour la promotion 1 pour une semaine (unité de temps = 4 séances)**

Créneaux \ Jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche	Api	Rel Clientèle		
Lundi	Sécurité	Secourisme		
Mardi	Communication	Cartographie	Api	Techno
Mercredi	Tp	Tp	Tp	Tp
Jeudi	Eps	Communication	Techno	
Vendredi	Expression	Expression	Techno	Techno
Samedi	Législation			

Table V.8 : Meilleur emploi du temps pour la promotion 1.

Nous remarquons que :

- Il n'y a pas de chevauchement donc l'emploi du temps est acceptable .
 - La charge maximale des formateurs permanents 12 Séances dans la semaine et 4 Séances dans la journée n'a pas dépassée.
 - Certaines charges des formateurs vacataires ont été respectés comme le formateur Boumaza en lui programmant ses modules dans la même journée.
 - Les modules TP et EPS n'ont pas été programmés dans la même journée .
- La pénalité est non nulle dans cette promo à cause des contraintes violées :
- Trois formateurs permanents ont été programmés les jours de fin de semaine (le module techno enseigné par le formateur Sidi achour, module expression enseigné par le formateur Hamouda et module législation enseigné par le formateur Ramdani) .
 - Pour le formateur Belouchi, les deux séances de son module de communication ont été affectés dans deux journées différentes.

La promotion 2 :

Chapitre V : Implémentation et résultats

Créneaux \ Jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche	Electronique	Electricité		
Lundi	Eps	Electrotechnique	Electrotechnique	
Mardi	Mesure	Electronique	Gaz	Exploitation
Mercredi	Chimie	Documentation		
Jeudi	Tp	Tp		
Vendredi	Equipment	Electronique	Chimie	Tp
Samedi	Electronique			

Table V.9 : Emploi du temps initial pour la promotion 2.

L'emploi du temps initial est généré de manière aléatoire, des cas de chevauchement sont fréquents, tels que le module électronique enseigné par le formateur permanent Sidi Achour, qui a été affecté dans le premier créneau lors de la première journée, alors que la matrice de disponibilité indique qu'il est occupé.

▪ **Meilleur emploi du temps pour la promotion 2 pour une semaine (unité de temps = 4 séances) :**

Le tableau ci-dessous présente le meilleur emploi du temps pour la promotion 2 sur une période d'une semaine, obtenu en utilisant la méthode essaim particulière en se basant sur l'emploi du temps initial et la matrice de disponibilité avec une pénalité de 20.

Créneaux \ Jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Eps	Electronique		
Mardi	Equipment	Electronique	Electronique	Chimie
Mercredi	Electrotechnique	Electricite	Documentation	Documentation
Jeudi	Mesure	Chimie	Tp	Exploitation
Vendredi	Electronique	Tp		
Samedi	Electrotechnique	Tp	Tp	Gaz

Table V.10: Meilleur emploi du temps pour la promotion 2.

Nous remarquons que :

- Il n'y a pas de chevauchement donc l'emploi du temps est acceptable .
- La charge maximale des formateurs permanents 12 Séances dans la semaine et 4 Séances dans la journée n'a pas été dépassée.
- Les modules TP et EPS n'ont pas été programmés dans la même journée.
- Les séances non consécutives pour les formateurs par rapport à leurs disponibilités ont été évitées.
- Les séances de Tp ont été intentionnellement évitées pendant les heures du soir.
- L'imposition d'une pénalité substantielle à cette promotion est justifiée par la présence de contraintes violées :
- La charge totale des formateurs vacataire a été intentionnellement répartie sur différents jours.
- Trois formateurs permanents ont été programmés les jours de fin de semaine (module électronique enseigné par le formateur Sidi achour, module électrotechnique enseigné par le formateur Bedrani et module mesure enseigné par le formateur Ramdani) .

V.9 Comparaison des pénalités entre les promotions :

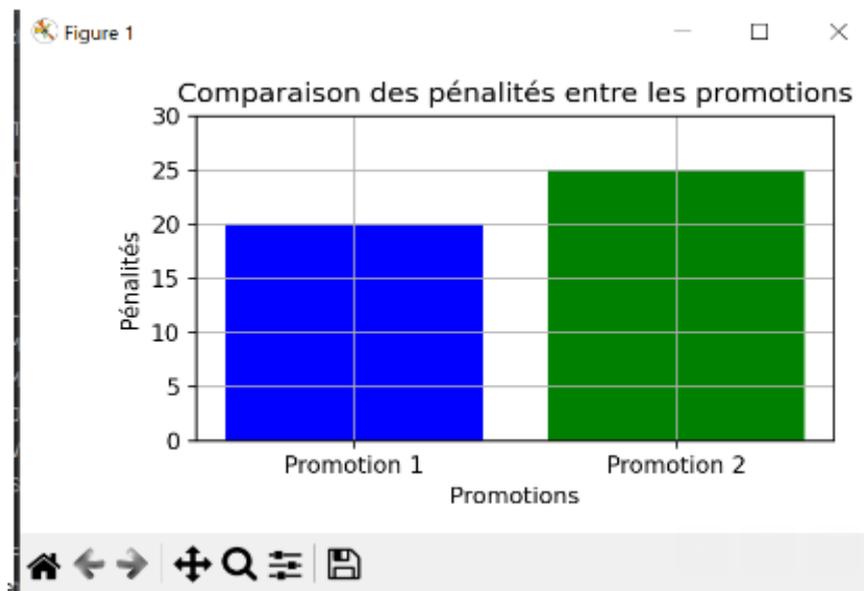


Figure V.8 : Comparaison des pénalités entre les promotions .

V.10 Comparaison entre Branch and Bound et PSO(1) pour la Génération d'emplois du temps :

La génération d'emplois du temps pour les écoles représente un défi crucial nécessitant une balance délicate entre la satisfaction des contraintes strictes et l'efficacité de la solution. Pour notre étude, nous penchons sur la comparaison entre deux approches : le Branch and Bound (B&B) et l'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO 1), appliquées à la planification des emplois du temps pour deux promotions distinctes. La promotion 1 nécessite la planification de 20 cours par semaine, tandis que la promotion 2 en nécessite 18, créant ainsi un environnement complexe nécessitant des solutions efficaces et rapides.

Chapitre V : Implémentation et résultats

	Branch and Bound (B&B)		Essaim particulière (PSO)(1)
	Avantages	Inconvénients	Avantages
Temps d'Exécution	Garantit une solution optimale en explorant systématiquement toutes les possibilités.	Temps d'exécution prolongé, ce qui peut être impraticable pour de grandes instances comme deux promotions simultanées (jusqu'à 5 heures pour deux promotions), limitant son applicabilité sur des configurations matérielles modestes.	Temps d'exécution rapide en comparaison avec B&B, grâce à une approche basée sur l'exploration heuristique (quelques secondes à quelques minutes pour deux promotions).
Couverture des Cours	Lorsque le temps le permet, B&B peut couvrir tous les cours tout en respectant strictement les contraintes.	Limité par le temps d'exécution sur des configurations matérielles moins puissantes, ce qui peut entraîner une couverture incomplète. (11 cours dans chaque promotions alors que on a 20 cours dans promotion 1 et 18 cours sure promotion 2).	Capable de couvrir tous les cours grâce à une exploration efficace de l'espace de recherche.
Pénalité et Satisfaction des Contraintes	Pénalité nulle indiquant une satisfaction complète des contraintes malgré une couverture partielle des cours.	La garantie d'une pénalité nulle est conditionnelle à la capacité de B&B à couvrir tous les cours.	Offre une flexibilité pour traiter des instances plus grandes.

Table V.11 Comparaison entre Branch and Bound et PSO(1) pour la Génération d'emplois du temps

Recommandation :

Lorsqu'il s'agit de choisir entre Branch and Bound (BB) et Particle Swarm Optimization (PSO) pour la génération d'emplois du temps, la décision dépend largement de la taille des données et des priorités spécifiques du problème :

1. Pour des données de petite taille avec un nombre limité de cours par promotion et où l'objectif principal est d'obtenir une solution sans aucune pénalité :

- Branch and Bound (B&B) est recommandé. Il garantit généralement une solution optimale en respectant strictement toutes les contraintes. B&B est particulièrement adapté lorsque la priorité absolue est donnée à la satisfaction totale des contraintes sans compromis.

2. Pour des données de grande taille, telles que notre problème impliquant deux promotions avec une complexité élevée et un grand nombre de cours :

- Particle Swarm Optimization (PSO) offre des avantages significatifs. Il est capable de générer rapidement des solutions couvrant la majorité des cours, même si cela peut conduire à des violations mineures de certaines contraintes.

- PSO excelle dans les situations où une couverture exhaustive des cours est cruciale dans un délai raisonnable. Malgré le risque accru de pénalités élevées dues aux violations de contraintes. Bien que les solutions de PSO ne garantissent pas une optimisation parfaite, elles fournissent des résultats approchés qui sont très utilisables dans des environnements réels.

IV.11 Comparaison de l'optimisation par essaim particulière (PSO) : Une Semaine vs Un Jour :

	Optimisation Hebdomadaire (Une Semaine) PSO (1)	Optimisation Journalière (Un Jour) PSO(2)
Pénalité Totale	Valeur obtenue 10.	valeur obtenue pour chaque jour 60, sur la semaine 420
Temps de Calcul	Temps de Calcul : 84.79686403274536 seconds	durée totale pour optimiser chaque jour 10 min , sur la semaine 1h 10min)

Table V.12 : Comparaison entre PSO (1) et PSO (2)

Analyse

En comparant les résultats de l'optimisation de l'emploi du temps en utilisant des intervalles hebdomadaires et journaliers, il est évident que l'optimisation hebdomadaire est plus efficace. L'optimisation hebdomadaire permet de traiter l'ensemble de l'emploi du temps en une seule itération globale, ce qui réduit considérablement le temps de calcul par rapport à l'optimisation journalière, où chaque jour doit être optimisé séparément. De plus, en optimisant sur une semaine complète, l'algorithme peut mieux équilibrer et répartir les contraintes sur plusieurs jours, ce qui conduit à des pénalités globales inférieures et à une meilleure satisfaction des contraintes. En résumé, l'approche hebdomadaire non seulement accélère le processus d'optimisation, mais améliore également la qualité du résultat final en minimisant les pénalités.

V.12 Conclusion :

D'après les résultats obtenus, choisir entre le Branch and Bound (B&B) et l'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO) pour la génération d'emplois du temps dépend de la taille des données et des objectifs spécifiques du problème. Pour notre cas d'étude impliquant deux promotions avec des besoins de couverture de cours différents, PSO s'avère plus rapide et efficace, bien que cela puisse entraîner des légères violations de certaines contraintes. En revanche, B&B offre une garantie de satisfaction stricte des contraintes sans pénalité, ce qui le rend idéal pour des ensembles de données plus restreints où la perfection dans la satisfaction des contraintes est cruciale.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à la résolution du problème d'emploi du temps au sein de l'école technique de Blida. Pour satisfaire les préférences des formateurs, des étudiantes et de l'administration.

Notre travail a été réalisé en deux phases : La première phase consiste en la modélisation du problème posé par l'école, en définissant une fonction objectif qui minimise les pénalités associées à chaque contrainte.

La seconde phase est la résolution du problème, nous avons d'abord appliqué la méthode exacte de Branch and Bound, qui a permis d'atteindre des solutions optimales avec zéro pénalité, répondant à toutes les contraintes, mais au prix d'un temps de calcul très long.

Ensuite, afin de réduire le temps d'exécution et de prendre en charge tous les données du problème, nous nous sommes orientés vers les métaheuristiques, où nous avons utilisé l'optimisation par essaims particulaires (PSO), où chaque particule représentait un emploi du temps possible, dans le but de minimiser les pénalités.

Enfin, nous avons comparé deux variantes PSO : (PSO1) optimisant sur une base hebdomadaire et (PSO2) sur une base journalière . (PSO 1), a montré une plus grande rapidité d'exécution et a généré moins de pénalités comparée à (PSO2).

En perspective, notre travail pourrait être sujet à des remaniements dans le but d'améliorer son efficacité. Ceci est réalisable soit par l'apport d'autres méthodes de résolution, soit par l'amélioration des techniques que nous avons implémentées, en incluant d'autres paramètres inhérents au problème traité. Parmi ces derniers :

- Intégration de nouveaux critères tels que la gestion des ressources humaines, la répartition équitable des charges de travail, l'optimisation des salles et des équipements.
- L'amélioration des méthodes exactes comme l'algorithme Branch and Bound est entreprise pour répondre spécifiquement aux défis des écoles techniques, assurant une planification sans chevauchement des cours et une gestion optimale des disponibilités des enseignants.
- L'étude approfondit de l'approche d'optimisation par essaim de particules (PSO), en explorant des stratégies pour ajuster les paramètres et intégrer des mécanismes de

recherche locale afin d'optimiser efficacement les emplois du temps, adaptés aux besoins spécifiques des établissements éducatifs.

ANNEXE

EMPLOI DU TEMPS

Promotion 1 :

Durée de formation : 26.01.2024 – 17.09.2024

Responsable : M. MEHDI

Créneaux Jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche	Api	Rel Clientèle		
Lundi	Sécurité	Secourisme		
Mardi	Communication	Cartographie	Api	Techno
Mercredi	Tp	Tp	Tp	Tp
Jeudi	Eps	Communication	Techno	
Vendredi	Expression	Expression	Techno	Techno
Samedi	Législation			

Institut de formation en électricité & gaz
École technique de Blida

EMPLOI DU TEMPS

Promotion 2 :

Durée de formation : 26.01.2024 – 17.09.2024

Responsable : M. SADDOK

Créneaux Jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Eps	Electronique		
Mardi	Equipment	Electronique	Electronique	Chimie
Mercredi	Electrotechnique	Electricite	Documentation	Documentation
Jeudi	Mesure	Chimie	Tp	Exploitation
Vendredi	Electronique	Tp		
Samedi	Electrotechnique	Tp	Tp	Gaz

Institut de formation en électricité & gaz
École technique de Blida

Promotion 3 :

Durée de formation : 23.02.2024 – 25.06.2024

Responsable : M. SKENDER

Les données :

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Chauche	TP. Exploitation	1
Bedrani	Electrotechnique	2
Belouchi	Documentation	2
Sidi achour	Electronique 2	1
Moulay	Electricité	1
Hammoda	Chimie	2
Belhadji	ESP 2	1
Skender	Math	1
Menacer	Gaz	1

EMPLOI DU TEMPS

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Chimie	Chimie	TP. Exploitation	
Mardi	Sécurité informa- tique	Electronique 2	Electricité	
Mercredi	Documentation	Tp		
Jeudi	Electrotechnique	Tp	Tp	
Vendredi	ESP 2	Math	Documentation	
Samedi	Tp	Gaz		

Institut de formation en électricité & gaz

École technique de Blida.

Promotion 4:

Durée de formation : 23.02.2024 – 25.06.2024

Responsable : M.MAKHLAF

Les données :

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Amrani	Tp.install	1
Chauche	TP. Exploitation	2
Belouchi	Documentation	1
Moulay	Electricité	1
Boumaza	TP	4
Makhlaf	CDP	1
Skender	Math	1
Ghoudjili	Techno de gaz	1
Menacer	Gaz	1

EMPLOI DU TEMPS

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche				
Lundi	Branchement	Tp	Tp. Exploitation	
Mardi	Techno de gaz	Cdp	Tp	Gaz
Mercredi	Tp			
Jeudi	Math	Tp.install	Tp	Tp.Exploitation
Vendredi	Electricité	Documentation		
Samedi				

Institut de formation en électricité & gaz

École technique de Blida .

Promotion 5 :

Durée de formation : 23.02.2024 – 25.06.2024

Responsable : M .BAHTOUL

Les données :

Formateurs	Modules enseignés	Nombres de séances
Chanane	Identification du matériel	1
Nouas	Comptage	1
Soum	Selection	1
Moulay	Electricité	1
Boumaza	TP	4
Makhlaf	CDP	2
Skender	Math	1
Ghoudjili	Techno de gaz	1
Bahtoul	RC	1
Menacer	Gaz	2

EMPLOI DU TEMPS

Créneaux jours	8h - 10h	10h - 12h	13h - 15h	15h - 17h
Dimanche	Tp			
Lundi	Rc	Electricité	Tp	Identification du matériel
Mardi	Gaz	Cdp	Tp	Gaz
Mercredi	Tp			
Jeudi	Schémas	Selection	Comptage	Tp
Vendredi	Cdp	Equipement		
Samedi				

Institut de formation en électricité & gaz École technique de Blida .

Bibliographie

- [1] ANZI Aicha , « Résolution d'un problème de programmation bi-niveaux linéaire par la méthode D.C. », Mémoire de Magister :Mathématiques Appliquées,2009.
- [2] ARRACHE.Saida , « cour master 2 :les métaheuristique »,2024.
- [3] BELLOUMI Rabie « Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe. », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en Électronique.
- [4] BOUNAB Yasmine, « programmation par contrainte des emplois du temps », master en informatique : ingénierie des systèmes d'informatique.
- [5] BOURAOUI Hamza, « Un outil d'aide à la décision basé sur les métaheuristiques pour la gestion du transport routier des hydrocarbures. Mémoire de master,2019.
- [6] Chapitre II Programmation Linéaire https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/plugin-file.php/43506/mod_resource/content/1/Chapitre%20II.pdf.
- [7] CHERTOUH Roumaissa ,KAMMECHE Dounia , « Conception d'un système de génération automatique des emplois du temps », mémoire de master .
- [8] GAHGAH Hadjer, « Problème d'emploi de temps : proposition un algorithme bio-inspiré », Mémoire de Master : faculté mathématiques et de l'informatique département d'informatique,2018.
- [9] GHERBOUDJ Amira , « Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques », Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat, 2013.
- [10] HAMDANI Amine, MADI Zakarya , « Application des méthodes exactes pour l'optimisation multicritère de la gestion de spectre dans les réseaux de radio cognitive », Master en Informatique : Réseaux et Systèmes Distribués (R.S.D),2018.
- [11] HENDI Nihad, BOUCHAKOUR MOUSSA Lamia, « Approche de coloration pour la gestion d'emploi du temps », mémoire de master : département de mathématiques,2021.
- [12] KHANFAR Kawther , « Optimisation De Quelques Fonctions Difficiles Par La Méthode PSO », Master en Automatique, 2022 .

- [13] KHECHEKHOUCHE Ali , « Prédiction de la tension de contournement par l'approche d'optimisation PSO », mémoire de master : Réseaux Électrique,2019.
- [14] IOANNIS X, et al. « Solving effectively the school timetabling problem using particle swarm optimization », ESEVIER.
- [15] M.MESSAOUDI Ouchene Mohamed, « élaboration d'un manuel de procédures de gestion d'une session de formation professionnelle spécialisée a l'ETB »,formation :PLD Management opérationnelle,2020.
- [16] Méthodes numériques et optimisation, un guide du consommateur Eric Walter.
- [17] Méthode de pénalité ENSIIE – Alain Faye Optimisation Mathématique.
- [18] MINGMING Wang , et al .« Genetic Algorithm-Based Particle Swarm Optimization Approach to Reschedule High-Speed Railway Timetables:A Case Study in China»,Hindawi, March 2019.
- [19] NOUIOUA Afrah, « Méthode et outils pour la recherche opérationnelle », mémoire de master : mathématiques appliquées,2021.
- [20] OUAMEUR Rima, Zaid Fatima, « Méthode de Branch and Bound pour la résolution d'un problème de minimisation concave », Mémoire de master : Mathématiques Appliquées,2020.
- [21] SMAIRI Nadia « Contribution à l'optimisation par essaim particulaire : l' adaptation de TRIBES à l'optimisation multi objectif »,thèse doctorat en informatique,2013.
- [22] TROUDI Fatiha , « Résolution du problème de l'emploi du temps : Proposition d'un algorithme évolutionnaire multi objectif », Magister en Informatique : Information & Computation, 2006 .
- [23] ZEMZAMI Maria ,et al , « Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité Electrical power transmission optimization based on a new version of PSO algorithm » .

Résumé :

Le projet de fin d'études qui nous a été proposé par l'école technique de Blida avait pour objectif de fournir un emploi du temps optimal respectant le maximum de contraintes définies par l'organisme d'accueil. Pour ce faire, une modélisation mathématique a été effectuée, ciblant une fonction objectif qui minimise les pénalités associées aux contraintes violées. Deux approches algorithmiques ont été élaborées : une méthode exacte (Branch and Bound) et une méthode métaheuristique basée sur l'optimisation par essaims particulaires (PSO).

Les programmes ont été implémentés en Python, offrant une flexibilité et une efficacité dans le développement et l'exécution des algorithmes. La méthode exacte a donné un résultat optimal en satisfaisant toutes les contraintes, mais uniquement pour des problèmes de petite taille en raison d'un temps d'exécution très long. En revanche, l'approche PSO a fourni des résultats très satisfaisants en prenant en compte un maximum de contraintes et dans des temps relativement courts pour des tailles de données importantes.

Mots-Clés : Optimisation par essaims particulaires (PSO), Méthode exacte, Algorithme de Branch and Bound, La fonction de Pénalités, Modélisation mathématique, Python

Abstract:

The end-of-study project offered to us by the Blida technical school aimed to provide an optimal timetable respecting the maximum constraints defined by the host organization. To do this, mathematical modeling was carried out, targeting an objective function that minimizes the penalties associated with violated constraints. Two algorithmic approaches were developed: an exact method (Branch and Bound) and a metaheuristic method based on particle swarm optimization (PSO).

The programs were implemented in Python, providing flexibility and efficiency in the development and execution of the algorithms. The exact method gave an optimal result satisfying all constraints, but only for small problems due to very long execution time. On the other hand, the PSO approach provided very satisfactory results by taking into account maximum constraints and in relatively short times for large data sizes.

Keywords: Particle swarm optimization (PSO), Exact method, Branch and Bound algorithm, Penalties function, Mathematical modeling, Python.